



Cevdet Emin Ekinci

Fırat Üniversitesi, cee@firat.edu.tr, Elazığ-Turkey

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2022.17.1.2A0186
ORCID ID	0000-0002-7113-4832
Corresponding Author	Cevdet Emin Ekinci

BETONDA RÖTRE: GENEL BİR BAKIŞ

ÖZ

Bu çalışmada, betonda rötre olayı ele alınmıştır. Genel bir yaklaşım olarak, betonların rötre yapması istenmez. Fakat betonlar değişik nedenlerle rötreye maruz kalır. Rötreye maruz kalmış betonların mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri olumsuz yönde etkilenir. Betonda rötre konusuyla ilgili geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Bu bağlamda rötre türleri, özellikleri ve rötre olayına etki eden faktörler açıklanmıştır. Rötre konusunda ileri sürülen yaklaşımlar açıklığa kavuşturulmuştur. Böylece sektör çalışanlarının rötre olayını daha iyi anlama, tanımlama, önlem alma gibi hususlarda bazı çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu çalışma neticesinde beton üretiminde alınacak bazı özel ve genel önlemlerle rötre oluşumunun önemli ölçüde bertaraf edilebileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, betonda meydana rötrenin tamamen çimento kaynaklı bir olay olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rötreye, Termik Rötreye, Hidrolik Rötreye, Karbonatlaşma Rötresi, Bünyesel Rötreye

SHRINKAGE IN CONCRETE: AN OVERVIEW

ABSTRACT

In this study, shrinkage event in concrete is discussed. As a general approach, shrinkage is not required for concretes. But concretes are exposed to shrinkage for various reasons. The mechanical, chemical and physical properties of concretes exposed to shrinkage are adversely affected. An extensive literature review has been made on the subject of shrinkage in concrete. In this context, shrinkage types, properties and factors affecting shrinkage are explained. The proposed approaches to shrinkage have been clarified. Thus, some solution suggestions have been developed in matters such as better understanding, defining, and taking precautions of the shrinkage event of the sector employees. As a result of this study, it has been understood that shrinkage formation can be eliminated to a great extent with some special and general measures to be taken in concrete production. In addition, it has been understood that shrinkage in concrete is entirely due to cement.

Keywords: Shrinkage, Thermal Shrinkage, Hydraulic Shrinkage, Carbonation Shrinkage, Intrinsic Shrinkage

How to Cite:

Ekinci, C.E., (2022). Betonda Rötreye: Genel Bir Bakış. Technological Applied Sciences, 17(1):1-38. DOI:10.12739/NWSA.2022.17.1.2A0186.



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton; çimentonun su, agrega, kimyasal ve/veya mineral katkı maddeler ile homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Çimentonun su ile buluşmasıyla hidrasyon başlar. Elde edilen taze karışım başlangıçta plastik kıvamdadır. Daha sonra taze beton içinde fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar olur ve zamanla sertleşerek yeni bir kütle oluşur. Bu reaksiyonlardan birisi de rötredir.

Betonun içerisindeki suyun fiziksel ve/veya kimyasal nedenlerle azalması (kaybolması) sonucunda betonun boyunda ve hacminde yer alan küçülmeye, "rötreye" veya "büzülme" denilmektedir. Rötreye ve/veya büzülme olayı, hem beton tazeyken hem de sertleşmiş durumdayken gerçekleşen bir olaydır. Ayrıca betondaki su miktarının, çimento hidrasyonu ve çevresel etkiler nedeniyle azalması sonucu çimento matrisinde iç gerilmeler oluşur ve beton büzülmeyle karşı zorlanır [20 ve 21].

Rötreye olayını açıklayan başka teoriler de bulunmaktadır. Bunlardan biri kılcallık teorisidir. Buna göre, kılcal borularda bulunan suyun buharlaşma yolu ile azalması ve bunun bir sonucu olarak, betonun büzülme yoluyla deformasyona uğramasıdır. Bir başka teoriye göre de buharlaşma yoluyla su miktarının azalması absorbe edilen su filminin kalınlığını azaltır. Bu kalınlığın azalması ile jel halindeki bileşikler birbirine daha çok yaklaşır ve rötreyi oluştururlar. Bunların yanında sıcaklık, rüzgar, düşük rutubet gibi etkenlerle birlikte terlemeye bağlı olarak betonda rötreye oluşmaktadır [20 ve 21].

Ayrıca rötreye, beton veya betonarme yapı elemanlarının hem mimari açıdan görünüşünü hem de dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Betonarme yapılarda betonun, basınç kuvvetini karşılamasının yanında donatıyı muhafaza etmek gibi bir görevi daha vardır. Ancak rötreye sonucunda oluşacak çatlaklardan hava, su ve kimyasal maddelerin donatıyı korozyona uğratması kaçınılmaz olacaktır. Bu yüzden rötreye, hem estetik hem de statik olarak kötü sonuçlara sebep olabilir [34].

Otopark zemin kaplamalarında, havaalanları pistlerinde, betonarme perde duvarlarda, dış cephe prekast elemanlarda, köprü ayaklarında, liman yapılarında hayati önem taşır. Özellikle kimyasal etkilere (sülfat, alkali-silika reaksiyonlar) maruz kalan betonarme yapı elemanlarında rötrenin neden olduğu çatlaklardan dolayı donatının korozyona uğraması kaçınılmazdır. Kısacası rötreye, yapının servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir [23 ve 45].

Akperov ve Akyüz (2006), mineral katkıların düşük dayanımlı betonların zamana bağlı deformasyonları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gibi normal dayanımlı betonlarda sünme ve rötreye beton içerisindeki çimento yüzdesinin azalması ve su-çimento oranının düşük olması rötreye olayını azaltmaktadır [6 ve 49].

Kaliteli beton üretiminde karışıma giren malzemelerin nicelik ve nitelikleri betonun dayanım, işlenebilirlik ve dayanıklılık konularında önemli etkilere sahiptir. Ayrıca beton, ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini hala korumaktadır [58].

Karakulak'a (2019) göre çimentoda katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasıyla (uçucu külün tane boyutu çok küçük ve ekonomik olması nedeniyle) rötreye çatlaklarının en aza indirilip yüksek dayanımlı betonlar üretilmesi mümkündür [35].

Atış yaptığı deneysel çalışmalarda (2000), betonda F sınıfı uçucu külün, çimentoyla %10-40 oranında ikame edilmesi neticesinde rötreye olayının azaldığını gözlemlemiştir [10].

Geçten ve Gül'e (2019) göre, gerek hafif ve gerekse normal betonlara uygulanan kür iyileştikçe (sulama sayısı arttıkça) su emmeler de azalma, yine sulama sayısına bağlı olarak rötreye hafif



betonda %95'e kadar, normal betonlarda ise %75'e kadar bir azalma olmaktadır [26].

Ulukaya (2008), betonun göstereceği plastik rötre miktarı, büyük ölçüde, betonun iç sıcaklığına, havanın sıcaklığına, rölatif nem miktarına ve rüzgar hızına bağlı olduğunu ileri sürmektedir [75].

Carette ve Malhotra ise 1992 yılında yaptıkları bir çalışmada, su/bağlayıcı (S/B) oranını 0.25-0.40 arasında değiştirdikleri betonların 3.5 yıl sonundaki karbonatlaşma derinliğini ölçmüş ve 0.25 su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda herhangi bir karbonatlaşma olayı ile karşılaşmamışlardır. Fakat S/B oranındaki artışla birlikte silis dumanı ilave edilen betonlarda karbonatlaşma ile karşılaşmışlardır. Su/(çimento+silis dumanı) oranının 0.40 olduğu betonlarda karbonatlaşma derinliği 8mm, şahit betonlarda ise 5mm olarak ölçülmüştür [55].

Pekmezci (2006), çimento miktarı yüksek, su/çimento (S/Ç) oranı çok düşük seviyelerde olan betonlarda yeterince su bulunmamasından dolayı otojen (hidratasyon-bünyesel) rötrenin salt kimyasal faktör dışında kendiliğinden kurumunun yol açtığı bir fiziksel etkiyle de arttığını gözlemlemiştir [58].

Taşdemir'e (2002) göre, rötre olayının iki önemli zararlı etkisi vardır. Bunlardan biri betonda çatlakların oluşması, diğeri de betonarme donatıda parazit gerilmelerin oluşmasıdır. Çatlaklar, betonun özellikle çekme dayanımını düşürürler. Ayrıca geçirimsizliğin artması nedeniyle betonun kimyasal etkilere ve donatı dayanıklılığını azaltıp, donatının korozyonunu kolaylaştırırlar [70].

Tuna'ya (2000) göre, rötre ve ısı farkları sonucu oluşan eksenel çekme çatlaklarının kabul edilebilir sınırı aşması (genelde 0.3 mm sınırı), boyuna donatısının yetersizliğinden ve iyi dağıtılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Büzülme neticesinde oluşan çatlaklar kiriş eksenine dik olarak elemanın dört yüzünde sürekli görülmektedir [74].

Wiegrint'e (1996) göre, kuru bir ortamla ilişkilendirildiğinde, betonda rötre oluşması kaçınılmazdır. Özellikle betonun üzerindeki mukavemet miktarı az miktardaysa sınırlandırılmış koşullar altında çekme gerilmeleri artar. Malzeme içerisinde zamana bağlı olarak çekme gerilmesiyle, malzeme mukavemeti de artar. Mukavemetin ve çekme gerilmelerinin karşılıklı olarak ortaya çıkması erken beton çatlaklarına sebep olur. Beton mukavemetinin limit kapasitesini aşması halinde, çekme gerilmeleri ani veya uzun süreli çatlaklara neden olur [88]. Bu gibi ani bozulmalar, betonun bütünlüğünü etkilediği gibi, uzun ömürlülüğünü ve durabilitesini etkiler.

Betonda rötre sonucu oluşan çatlaklar engellenemez. Çimento ve suyun hidratasyonu sonucu oluşan hacim azalması sonucu oluşan rötre düşük değerlerde olmaktadır. Betonun kuruması sırasında suyun buharlaşması sonucu oluşan hacim azalması ise en fazla görülen rötre tiplerinden biri olarak kabul edilmektedir. Eğer betonda çok fazla rötre oluşursa, yapının dayanıklılığı ciddi bir şekilde zarar görmektedir [21, 57 ve 91].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada betonda rötre olayı ele alınmıştır. Rötre betonda önemli bir sorun olup, betonun bütün evrelerinde meydana gelmektedir. Bu bağlamda çalışmada rötre türleri, özellikleri, rötre olayına etki eden parametreler, rötreye karşı alınabilecek önlemler vb. konular geniş bir literatür desteğiyle ele alınmış, karşılaşılabilecek sorunlar için çözüm önerileri sunulmuştur. Çalışma beton ve betonun maruz kaldığı rötre olayı konusunda yapılacak çalışmalara ışık tutabilecek niteliktedir.



3. RÖTRE TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ (TYPES AND PROPERTIES OF SHRINKAGE)

Betonun büzülmesi hacim azalmasıyla sonuçlanan bir çok faktörden etkilenen, çok yönlü kompleks bir olaydır. Hacim değişiminden kaynaklı üç boyutlu bir olay olan büzülme, boydaki kısalmanın ölçülmesi şeklinde lineer şekil değiştirmeye basite indirgenerek gözlemlenebilmektedir. Betonda meydana gelen rötrenin temel nedeni su içeriğinin azalmasıdır. Rötrenin türlerinde çok farklı mekanizmalarda mevcuttur. Yani büzülme dolaylı olarak etkileyen ve büzülme derecesini belirleyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında malzemenin özellikleri, kuruyan ortama bırakılan betonun yaşı, çevrenin bağıl nemi ve sıcaklığı, elemanın veya yapının boyutları vs. sayılabilir [1 ve 57].

Betonun en önemli sorunlarından biri, hacim büzülmesi, yani rötredir. Farklı faktörlere bağlı olarak meydana gelen beş rötrenin türleri mevcuttur. Bunlar ekolojik (kuruma rötresi-hidrolik rötrenin türleri), plastik (erken) rötrenin türleri, termik rötrenin türleri, karbonatlaşma rötresi ve bünyesel rötredir [4]. Kuruma rötresi bunlar arasında en çok incelenen ve etkinliği en yüksek varsayılan rötrenin türüdür. Bu rötreye hidrolik rötrenin türleri veya ekolojik rötrenin türleri adının verilmesi, ortamın sıcaklığı, rutubeti ve rüzgarının etkisiyle su kaybının meydana gelmesi sonucu oluşmasıdır.

Bünyesel rötreye son yıllarda, yeterli olmamakla beraber, otojen rötrenin türleri adı da verilmeye başlanmıştır. Bu rötrenin türleri 1900'lerde Le-Chatelier tarafından bulunmuş ve tanımlanmıştır. Olay, karışımdan önceki çimento mutlak hacmi ve su mutlak hacminin toplamının hidrasyondan sonra daha düşük bir hacme dönüşmesidir. Çünkü suyun hidrate elemanların molekülleri içine girmesi ile yani bir kimyasal reaksiyon sonucu hacimsel bir büzülme meydana gelmektedir. Bu büzülmede kuruma rötresinde rastlanan ağırlık kaybı yoktur ve madde hidrasyondan önceki ağırlığını korur. Bu kimyasal değişimin dış görünüşü hacimde nasıl bir rötrenin türleri oluşturduğunu hakkında kesin bir yanıt bulunmamaktadır [58].

2.1. Plastik (Erken Plastik) Rötrenin Türleri (Plastic (Early Plastic) Shrinkage)

Plastik rötrenin türleri, taze betondaki plastiklik henüz tamamen kaybolmamış durumdayken betonun yüzeyinde yer alan bu büzülme plastik büzülme olarak denir. Erken yaşlarda görülür. Plastik rötrenin türleri beton mukavemeti üzerinde zararlı etkisi yoktur.

Plastik rötrenin türleri (Resim 1) mekanizma gelişimi şöyledir. Taze betonda parçacıklar arasındaki boşluk tamamen suyla kaplıdır. Beton içerisindeki su, yüzeydeki buharlaşma gibi çeşitli dış etkenler neticesinde hamurdan ayrıldığında beton içerisinde karmaşık bir menisk sistemi oluşacaktır. Bu menisk oluşumu, hamurda büzülme neden olacak negatif kapiler basınç doğuracaktır. Kapiler basınç gelişmeye başladıktan sonra kısa bir süre içerisinde plastik rötrenin türleri başlamaktadır. Çimento hamuru içerisindeki kapiler basınç, kritik kırılma basıncı (P_c) değerine gelinceye dek artacaktır. Bu noktadan sonra beton içerisindeki su, düzgün şekilde dağılmayacak ve betondaki boşluklarla arasında ayrık bölgeler oluşturmak suretiyle yeniden düzenlenecektir. Plastik rötrenin türleri maksimum hıza sözü edilen kırılma basıncından hemen önce ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra ise az miktarda rötrenin türleri meydana gelmekte yani deformasyon seviyesi düşmektedir [45]. Plastik büzülmenin teorik olarak çimento hamurunun sıkışmasına neden olması açısından yararlı olduğu söylenebilir ancak pratikte plastik büzülmenin etkisi hamur içinde uniform değildir. Hacim değişimlerinin

farklı olması sonucu oluşan çekme gerilmeleri nedeni ile çatlama oluşabilir.

Plastik rötrenin en genel oluşma şeklinin açıklaması ise şöyledir: Taze beton yerleştirildikten sonra agrega dibe doğru çöklerken su yüzeye doğru çıkmaya başlar. Yüzeydeki su, rüzgar veya güneşin etkisiyle buharlaşırken beton içinde hidratasyon bünyedeki suyu kullanmaya devam eder. Bu aşamada yüzeydeki buharlaşma hızı, terleme hızından fazla olursa betonda "plastik rötire" meydana gelir [51]. Plastik erken rötrenin sonucu olarak beton yüzeyinde kapileriteden dolayı mikroskobik ölçekte hacim değişiklikleri olur. Bu hacim değişikliğinden dolayı beton yüzeyinde çatlaklar oluşur. Çünkü bu bölge yani yüzey, çoğunlukla çekme gerilmelerini karşılayacak elemanlardan yoksun bölgelerdir [52].



Resim 1. Plastik (erken plastik) rötire örneği [81]
(Photo 1. Plastic (early plastic) shrinkage example)

Beton içerisinde veya yüzeyinde kapileriteden dolayı oluşan menisk hali betonda bir basınç etkisi oluşturur. Üst kısım büzülme zorlanırken, alt kısım sıkışmaya başlar. Bu basınç etkisi beton içindeki suyun, kılcal boşluklardan yukarı doğru çıkışını hızlandırır. Basınç etkisiyle kendisine daha kolay ve kalıcı bir yol açan su, betonun ilerleyen zamanlarda donatısının korozyona uğramasına neden olacak bu boşlukları da birleştirmiş ve betonun geçirimsizliğini arttırmış olur. Taze betonda karışımın hazırlanmasından itibaren bir kaç saat içinde meydana gelen rötire plastik rötredir. Plastik rötire sonucu beton yüzeyinde örümcek ağı gibi gelişigüzel biçimde çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar beton iç kısmına ulaşamaz. Bu nedenle plastik rötrenin beton mukavemeti üzerinde fazla zararlı etkisi yoktur, denilebilir.

Aslında plastik rötire çatlaklarının oluşum nedeni, beton karışımında kullanılan ve kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun boşluklardan kapilerite yoluyla yukarı çıkmasıdır. Terleme veya kuma adı verilen bu olay, betonun yerleştirilip perdahlanmasından 2-4 saat sonra yüzeyde parlama şeklinde görülür. Yüzeye çıkan bu su dış etkilerle buharlaşır ve betonun yüzeyi kuruyup matlaşır. Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta taneler yaklaşarak hacim büzülmetedir. Büzülen çimento harcı, iri agrega veya donatı tarafından engellenirse, henüz çekme dayanımı yeterli olmayan beton kolayca çatlar. Taze beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı $0.5\text{kg/m}^2/\text{saat}$ ten daha çok olduğu takdirde, plastik büzülme çatlakları oluşmaktadır. Plastik büzülme neden olan bir diğer etkende beton kütlelerinde ki suyun bir miktarının beton taban malzemesi ve kalıplar tarafından emilmesidir. Plastik büzülme ve plastik büzülme çatlakları çoğu zaman beton döşemeler ve



park yerleri gibi geniş yüzey alanına sahip betonlarda sıkça görülmektedir.

Plastik rötreye yol açabilecek bir başka neden de beton kütleindeki suyun bir miktarının, betonun altında yer alan taban malzemesi tarafından veya kalıplar tarafından emilmesidir. Bu durum, betonda çatlamaya neden olabileceği gibi yüzeydeki buharlaşmanın etkilerini de şiddetlendirebilmektedir [23 ve 51].

Plastik rötreye oluşümünün engellenmesi için rötreye oluşturabilecek koşullarda geçici rüzgar kesiciler beton yüzeyinde kullanılabilir. Mümkünse sıcaklığı kontrol etmek adına gölgelikler oluşturulabilir. Gün doğuşu öncesi uygulamalar kritik sıcaklara sahip hava koşulları olduğu durumlarda etkilidir. Çok kuru ve sıcak zamanlarda, sis spreylere de buharlaşma hızını düşürmek amacıyla kullanılabilir. Buharlaşma hızı yüksek zamanlarda zemin nemlendirmesi de rötreye engel olabilir. Islak çuvalar ve ya polietilen örtülerle beton yüzeyi kaplaması bitirme işlemleri esnasında kullanılabilir. Düzenli kürelemelere mümkün olduğunca çabuk başlanmalıdır.

Ayrıca plastik rötreye ve çatlakların önlenmesi için rüzgara açık inşaat alanlarında rüzgarın taze beton yüzeylerine direkt olarak temas etmesi önlenmeli güneş ışığına açık inşaat alanlarında kuru ve sıcak havalarda geniş yüzeyli betonlar tercihen gece dökülmeli ve yüzey ıslahı muhakkak yapılmalıdır. Soğuk havalarda ise betonu fazla ısıtmaktan kaçınılmalıdır. İstenilen kalitedeki beton karışımı, mümkün olduğunca düşük su/çimento oranlarında elde edilmelidir. Çatlama olayı yüzeydeki buharlaşmanın hızlı olmasından kaynaklandığına göre yüzeydeki nem oranını yüksek tutmak gerekmektedir. Bunu sağlamak için de döşeme ve zemin betonlarında, kalıp ve zemin beton dökümü öncesi sulanarak nemli tutulmalı, olanaklar elveriyorsa kalıp yağı vb. gibi malzemeler kullanılarak kalıplar yağlanmalıdır. Betonarme yapılarda donatılar önemli bir gerekçe olmadan arttırılmamalıdır. Zira bir kesitte donatı miktarının artması, betonun çekme gerilmesinin artmasına neden olur. Diğer taraftan donatıların da olası olduğu kadar simetrik yerleştirilmesi lazımdır. Bu surette rötreye gerilmelerinin uniform bir şekilde yayılması sağlanır ve bu gerilmelerin, bu suretle bazı noktalarında büyük bir değer almasının önüne geçilmiş olur. Yerine yerleştirilen betona uygulanması düşünülen kür yöntemi hemen uygulanmalı ve su ile gerçekleştirilen küre en az 7 gün devam edilmelidir.

Plastik büzülme çatlaması hızlı buharlaşmanın görüldüğü yatay yüzeyli döşeme yüzeylerinde çok yaygındır. Bu çatlaklar yüzeyin bütünlüğünü bozmakta ve durabiliteyi azaltmaktadır. Yüksek rüzgâr hızı düşük bağıl nem, yüksek hava sıcaklığı ve beton sıcaklığı plastik büzülme çatlamasını arttırıcı yönde rol oynar. Plastik büzülme rüzgar hızı azaltılarak beton sıcaklığı düşürülerek ve betonun prizi hızlandırılarak kontrol edilebilir. Kontrol etmenin en yaygın yöntemi beton yüzeyini ıslak tutmaktır [93].

2.2. Bünyesel (Hidratasyon-Otojen) Rötreye (Structural (Hydration-Autogenous) Shrinkage)

Konu ile ilgili farklı literatürde bünyesel rötreye hidratasyon ve otojen (autogenous) rötreye isimleriyle de anılmaktadır (Resim 2). Bünyesel rötreye çimento hidratasyon ürünlerinin daha az hacim kaplar. Bünyesel rötrenin varlığı 1904'de ilk Le Chatelier tarafından ortaya atılmıştır. Taze betonda, çimento ve su arasındaki reaksiyonların devam edebilmesi için, genellikle yeterli miktarda su vardır. Betonun içerisindeki suyun önemli bir miktarının herhangi bir nedenle kaybolması durumunda hidratasyon yavaşlar. Hidratasyonun devam edebilmesi için yeteri miktarda su bulunması gerekmektedir. Bu suyun

olmaması durumunda bünye büzülme meydana geliyor. Bünyesel rötire, betonun dış etkenlerden (bağıl nem, rüzgar, kür vb.) bağımsız olarak sadece kendi bünyesindeki çimento hidratasyonunun neden olduğu hacimsel değişimden kaynaklanan rötredir [42].

Çimento, su ile temas ettiğinde hidratasyon işlemi başlamaktadır. Fakat hidratasyon sonucu oluşan çimento-su karışımı hacim olarak hidratasyona girmemiş çimento-su karışımı miktarından daha az olacağından bu aşamada betonda küçük bir hacimsel değişiklik olur. Hidratasyonun neden olduğu bu kendiliğinden kuruma için çimento ağırlığının yaklaşık %25'i kadar su gerekmektedir. Bu yüzden bünyesel rötire normal veya yüksek S/Ç oranlı betonlar yerine düşük S/Ç oranlı (<%40), yüksek mukavemetli betonlarda gözlenir [14].

Katkı maddelerinin betonda kullanılmadığı dönemde, betonun işlenebilirliğini arttırmanın en yaygın yolu S/Ç oranını arttırmaktır. Günümüzde ise yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri sayesinde düşük S/Ç oranında daha mukavemetli ve işlenebilir beton üretmek mümkündür. Bu nedenle bünyesel rötire, önceki yıllardan çok günümüzde üzerinde çalışma yapılan bir konu olmuştur.



Resim 2. Bünyesel-hidratasyon-otojen (autogenous) rötire örneği [85]
(Photo 2. Example of structural-hydration-autogenous shrinkage)

Zhang ve ark. (2003), düşük S/Ç oranlarında çalıştıkları betonlar üzerinde bünyesel rötrenin, silis dumanının artması ve S/Ç oranının azalması ile arttığını belirtmektedir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmada 98 güne kadar olan bünyesel rötire mukavemetinin %60 ve daha fazlası ilk iki hafta içerisinde meydana geldiği gözlemlenmiştir [95].

Mazloom ve ark. (2004), silis dumanının toplam rötire üzerinde etkisinin olmadığını, karışımdaki silis dumanının artmasıyla yüksek mukavemetli betonlarda bünyesel rötrenin arttığını, kuruma rötresinin ise azaldığını belirtmektedir [43].

Pekmezi (2006), çimentoda bulunan çözünen alkalilerin ve süper akışkanlaştırıcı kullanımının, yüksek performanslı çimentolu ürünlerin otojen rötresi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmasında değişik kimyasal bileşenlere sahip çimentolar kullanılarak değişik S/Ç oranlarında, süper akışkanlaştırıcı içeren ve içermeyen hamur, harç ve beton numuneler üretilmiş, erken ve ileri yaşlarda yapılan deneylerle bu numunelerin otojen rötireleri belirlenmiştir. Bu çimentoların hidratasyon aşamaları da çeşitli yöntemlerle takip edilmiş, çimentolarla üretilmiş hamurlar üzerinde yapılan mikroporozite deneyleriyle numunelerin kılcal boşluk dağılımları ve oranları belirlenmiştir. Sonuç olarak otojen rötrenin gelişimi, hidratasyonla olan ilişkileri ortaya çıkarılmış, çözünen alkalilerin ve



süperakışkanlaştırıcı kullanımının bünyesel rötre üzerindeki etkileri belirlenmiştir [58].

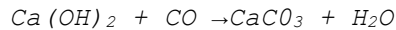
Yue ve ark. (2010), mineral katkılı çimento pastalarının boşluk yapısı ve bünyesel rötreleri arasındaki ilişki üzerine yaptıkları çalışmada silis dumanı ve uçucu kül ile bir grup, yüksek fırın cürufu ile uçucu kül ile ikinci bir grup karışım hazırlamışlardır. Uçucu külün rötreyi azalttığını, silis dumanın ise artırdığını, yüksek fırın cürufunun ise silis dumanı ile uçucu kül arasında bir yerde olduğunu ifade etmektedirler [94].

Pekmezci ve ark. (2007), çimentolardaki çözünen alkali miktarları fizikokimyasal otojen rötre (FKOR) büyüklüğünü arttırma yönünde etkinlik taşımaktadır. Bunun yanında C3A, C4AF, (SO₃/çözünen alkali oranı) ve incelik parametreleri de FKOR'yi etkileyen etkenler arasında dikkate alınması gerektiğini söylemektedirler [59].

Sonuç olarak, Yerine yerleştirilmiş olan taze betonda, çimento ve su arasındaki reaksiyonların devam edebilmesi için, genellikle yeterli miktarda su bulunmaktadır. Ancak betonun içerisindeki suyun önemli bir miktarının herhangi bir nedenle kaybolması durumunda, kapiler boşluklardaki rölatif buhar basıncı azalmakta ve hidrasyon yavaşlamaktadır. Bir süre sonra hidrasyonun devam edebilmesi için yeterli su bulunmamaktadır. Bu suyun olmaması durumunda hidrasyon büzülme meydana geliyor. Hidrasyon büzülmenin miktarı aslında ihmal edilebilecek kadar azdır [93].

2.3. Karbonatlaşma (Kimyasal) Rötresi (Carbonation (Chemical) Shrinkage)

Betonun içerisindeki çimentonun hidrasyonu sonucunda ortaya çıkmış olan ve çimento hamurunun yapısında yer alan kalsiyum hidroksitin bir kısmı betonun içerisine sızan sular tarafından çözünmektedir. Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) eriyiği içeren sular, kapiler hareketle, beton yüzeyine veya yüzeye yakın bölgelere hareket etmektedir. Kalsiyum hidroksitin havadaki karbondioksit (CO₂) ile temas etmesi sonucunda kalsiyum karbonat (CaCO₃) oluşmakta ve ayrıca bir miktar su açığa çıkmaktadır. Bu durum aşağıdaki formülle gösterilmektedir.



Karbonatlaşma olayıyla, betondaki çimentoda yer alan kalsiyum hidroksitin yapısındaki su açığa çıkararak buharlaşma veya benzeri nedenlerle kaybolur. Bünyesindeki suyun bir bölümünü bu şekilde kaybetmiş olan çimento hamuru, bir miktar büzülme gösterir. Karbonatlaşma büzülmesi nedeniyle betonun yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerinde çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar gelişigüzel yönlerde uzanan, çok derin olmayan çatlaklardır. Karbonatlaşmanın gerçekleşebilme hızı, betonun geçirimsizliğine, havadaki CO₂ ve relatif nem miktarına bağlı olmaktadır. Karbonatlaşma olayıyla meydana gelen bu büzülmeye karbonatlaşma rötresi denir. Karbonatlaşma rötresi olarak isimlendirilen bu işlem su veya ağırlık kaybıyla ilgili değildir. Hatta karbonatlaşma rötresi sonunda ağırlıkta bir miktar artış da olur. CO₂ çimento hamurundaki serbest Ca(OH)₂ (kalsiyum hidroksit)'i etkileyebilir ve aşağıdaki basitleştirilmiş reaksiyona sebep olabilir.

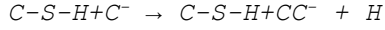
Karbonatlaşma rötresinin (Resim 3) mekanizması ile ilgili çeşitli teoriler vardır. Bunlardan bir tanesi; Ca(OH)₂, boşluklardaki menisklerin mevcudiyetinden dolayı bir basınç gerilmesi altındadır. Bu kristaller dayanak görevi görürler ve CSH jel parçacıklarının çökmesini engellerler. Ca(OH)₂'in çözülmesi ve yerine gerilme altında olmayan CaCO₃ çökeltisine dönüşmesi, CSH jelinin çökmesine neden olabilir. Bu da rötreye yol açar [62]. Diğer bir teoriye göre, yukarıdaki formülde de görüleceği üzere Ca(OH)₂, CaCO₃'a dönüşürken H₂O



(su) açığa çıkar ve bu su, ortaya çıktıkça ıslanma-kuruma çevrimiyle buharlaşıp rötreye neden olacaktır [64 ve 87].

Karbonatlaşmaya maruz kalmış beton su kaybeder ve gerçekte maruz kaldığı bağıl nemden çok daha düşük bir bağıl nem derecesinde kuruyormuş gibi davranır. Bu koşullardaki su kaybı-rötreye ilişkisi, normal kuruma için gözlemlenen durumla benzerlik gösterir. Bunun yanında, karbonatlaşma rötresi tamamen tersinir olmayan şekilde gerçekleşir.

C-S-H jelinin CO₂ ile girdiği reaksiyon:



şeklinde gösterilmekte ve beraberinde su kaybı oluşmaktadır. Ayrıca reaksiyon boyunca C/S oranı da düşmektedir.

C-S-H jelinin karbonatlaşması, rötrenin tersinir olmayışının nedeni de olan, malzemedeki bağ yapısının özelliklerini değiştirmektedir. Böylelikle C-S-H içerisinde, yalnızca çok düşük bağıl nem koşullarında meydana gelebilen değişiklikler, karbonatlaşma sayesinde vuku bulmaktadır. Buna ilaveten, kalsiyum hidroksit atmosferdeki CO₂ ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonata dönüşmekte ve karbonatlaşma rötresine neden olmaktadır. Buna göre, kuruma rötresi kaynaklı basınç gerilmesi altındaki Ca(OH)₂ kristalleri çözünerek gerilme altında olmayan bölgelerde Ca(CO)₃ çökeltisine dönüşmekte ve hidrate çimento hamurunun sıkışabilirliği geçici olarak artmaktadır [45 ve 51].

Karbonatlaşma rötresi tersinir olmayan yapısından ötürü ön yapımlı (prekast) betonlarda avantaj olarak değerlendirilebilmektedir. Örneğin; bir beton bloğun (karbonatlaşma sürecini hızlandırmak için) CO₂ içeriği zengin havaya maruz kalması sonucu beton boyutları, sonradan gelecek ıslanma-kuruma çevrimlerine karşı çok daha kararlı bir hal almaktadır. Öte yandan karbonatlaşma, yerinde dökülen betonlarda çok zararlı olmaktadır. Blok haldeki betondan çok daha az geçirgen olduğu için yerinde dökülen betonlarda karbonatlaşma, yalnızca maksimum kuruma hızının hâsıl olduğu dış ortamlarda gerçekleşmektedir. Bu sonuçla karbonatlaşma rötresi azami dereceye çıktığında ve kuruma rötresine eklendiğinde betonda şiddetli rötreye çatlakları ortaya çıkmaktadır.

Kış aylarında, petrol yakıtları tarafından ısıtılan kapalı ortamlarda kür edilen betonlarda karbonatlaşma hasarı görülebilmektedir. Bu durum, bağıl nem korunmadığı takdirde süratli kurumaya bağlı aşırı plastik rötreye oluşumuna neden olacaktır. Yetersiz şekilde havalandırılmış kapalı ortam içerisindeki yüksek seviyedeki CO₂'de karbonatlaşmaya sebebiyet verebilmektedir. Böyle bir ortam, yüzeyin tozlanıp kirlenmesine veya çatlamasına öncülük etmektedir. Uzun dönem içerisinde, özellikle kapalı otoparklarda görülebilecek yüksek CO₂ seviyesi neticesinde yine karbonatlaşma hasarı görülebilmektedir [45].

Karbonatlaşma rötresi prefabrike eleman üretiminde dikkate alınan bir özelliktir. Priz ve sertleşme aşamasında ortamda mevcut CO₂ gazlarının beton bünyesine difüzyon yapmaları sonucu, içyapıda bazı karbo-alüminat'lar oluşur. Bu olayın bir büzülme ile meydana geldiği gözlenmiştir. Rutubetin çok yüksek olduğu ortamlarda CO₂ difüzyon olamaz ve karbonatlaşma rötresi yoktur. Rutubetin çok düşük olduğu ortamlarda ise salt CO₂ difüzyonu anlam taşımaz. Rötreye için CO₂'nin asit karbonik şeklinde süzülmesi gereklidir.

Aköz ve arkadaşlarının (1997), silis dumanı katkılı beton özelliklerine kür koşullarının etkilerini araştırdığı bir çalışmada, karbonatlaşma derinliğinin zamana bağlı olarak arttığı ve silis dumanı miktarının artması ile de artış gösterdiğini bundan dolayı basınç dayanımı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin azaldığını gösteren

bağıntılarının özellikle silis dumanı için yeniden gözden geçirilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir [5].

Person (1998), yüksek mukavemetli betonların rötresi üzerine yaptığı nümerik ve deneysel çalışmada 8 farklı beton karışımına değişik tip ve miktarlarda silis dumanı ilave etmiş, toplam rötrenin numune yaşı, S/B oranı ve silis dumanının tip ve miktarına bağlı olduğunu, silis dumanı ilavesi ile karbonatlaşma rötresinden kaçınılabileceğini belirtmiştir [60].

Sonuç olarak, sertleşmiş çimento hamuru CO₂ (Karbondioksit) ile kimyasal olarak reaksiyona girer, atmosferde mevcut CO₂ miktarı çimento hamuru ile uzun bir dönemde reaksiyon yapacak düzeye ulaşabilir. Bu reaksiyon karbonasyon olarak bilinen büzülme karakterinde bir reaksiyondur. Çimento hamurunun CO₂ ile reaksiyon derecesi ve dolayısı ile oluşan karbonasyon büzülmesi bağıl nemin bir fonksiyonudur.

Maksimum büzülme %50 bağıl neme karşı gelmektedir. Yüksek bağıl nem durumunda gözeneklerin su ile dolu olması nedeni ile CO₂'in hamur içine girmesi zorlaşır ve bu nedenle karbonasyon olayı ya görülmez ya da çok düşük düzeyde gerçekleşir. Çok düşük nem oranlarında bünyede bir su filmi oluşmaması nedeni ile karbonasyonun çok düşük düzeyde gerçekleştiği düşünülmektedir. Düşük nem oranları hariç maksimum karbonasyon büzülmesinin kuruma sürecinden ziyade hemen kuruma sonrası oluştuğu düşünülmektedir.

Karbonasyon büzülmesi tamamen kalıcı olup CO₂'nin C-S-H ile reaksiyonu sonucu beraberinde su kaybı oluşturan bir kimyasal reaksiyondur [93].

Kimyasal rötre bünyesel-hidratasyon-otojen rötre, prizın başlamasından sonra bağlayıcı fazda meydana gelen makroskobik hacim küçülmesidir. Hidratasyonun başlamasıyla hemen ortaya çıkan ve ilk 24 saat zarfında en büyük etkinliği gösteren bu toplam erken rötre halen evrensel bir tanıma ve ada kavuşturulamamıştır. Bir kısım araştırmacı bünyesel-hidratasyon-otojen rötreyi kimyasal ve kendiliğinden kuruma (self-dessication; iç kuruma) rötrelere toplamı olarak değerlendirmekte, bir diğer grup ise bünyesel-hidratasyon-otojen rötre deyimini kimyasal rötreden ayırmaktadır. Bünyesel-hidratasyon-otojen rötre kavramının daha iyi anlaşılması için kimyasal rötre, kendiliğinden kuruma ve kendiliğinden kuruma rötresi mekanizmalarının daha ayrıntılı incelenmesi faydalı olacaktır [4 ve 75].

Geç yaşlarda görülür (Resim 3). Kimyasal rötreye yönelik ölçüm sistemi, otojen rötre sisteminin aynısıdır. Kimyasal rötre gelişimi ve hidratasyon ısısının her ikisi de, hidratasyon reaksiyonunun birer göstergesidir.



Resim 3. Karbonatlaşma-kimyasal rötre örneği [81]
(Photo 3. Example of carbonation-chemical shrinkage)

Sertliğini yeni kazanmış genç betonlarda oluşan diğer türleri de kimyasal ve otojen-hidratasyon rötrelere gelir. Kimyada hidratasyon olayı daima hacim azalması ile meydana gelir. Nitekim hidrate olmuş çimento hamurunun mutlak hacmi, üretim için kullanılan çimento ve suyun mutlak hacimlerinin toplamından daima küçüktür. Bu olaya kimyasal rötreye denilmektedir. Bunun dışında sertleşmenin hemen sonrasında çimento hamuru, dış ortama tamamen kapalı olsa, hiç su kaybetmese ve ağırlığı azalmasa dahi büzülme, rötreye yapmaktadır. Kendiliğinden kuruma (self-dessication) olayına dayanılarak açıklanan bu rötreye bünyesel-hidratasyon-otojen (autogenous shrinkage) denilmektedir. Özellikle düşük S/Ç oranları ile ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen yüksek performanslı ve mukavemetli betonlarda bu rötreye türleri önem kazanmaktadır. Kimyasal rötreye ve otojen rötrenin toplamı (bünyesel rötreye) bu betonların çatlamasına yol açmaktadır. Kendiliğinden yerleşen (self-compacting) ve kalın dökülmeyen yüksek performanslı betonlarda, bu rötrelere plastik rötreye çatlaklarına karşı alınacak önlemlerle giderilmesi mümkün değildir. Zira oluşumları sertleşmeden hemen sonra meydana gelmektedir [57 ve 82].

2.4. Kuruma (Hidrolik-Ekolojik) Rötreye (Drying (Hydraulic-Ecological) Shrinkage)

Beton dökümünden sonra çevre koşullarına göre ısı dengeleninceye kadar betonun çevresiyle ısı alışverişi devam eder. Erken yaşlarda görülür. Eğer yüzeydeki ısı, iç ısıdan az ise beton içerisinde su, ısı dengeye ulaşmaya kadar buharlaşır. Yine beton ve çevresi arasında nem farkı da su buharı transferine yol açar. Ortamın rutubeti, betonun kendi rutubetinden az ise, buharlaşma rutubetin fazla olduğu taraftan kuru tarafa devam edecektir. Bunun sonucunda betonda mikroskopik ölçekte büzülme meydana gelir, buna kuruma rötresi denir. Betonda kuruma rötresinin (Resim 4) miktarı suyun buharlaşma hızıyla değil, beton içindeki suyun difüzyon hızıyla ilgilidir. Çünkü betonun yüzeyine yakın kısımlardaki su, havadaki nemle çabucak dengeye ulaşırken iç bölgelerdeki nem dengesi, betonun difüzyona müsaade hızıyla alakalı olacaktır [34].

Betonun sertleşmesi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda su harcanır. Ayrıca beton kapiler boşlukları içindeki su zamanla buharlaşır. Bu olaylar beton sertleştikten sonra da devam ve kuruma rötresi meydana gelir. Kuruma büzülmesi yani rötresi, sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması (betonun kuruması) sonucunda yer alan büzülme ifade etmektedir.



Resim 4. Kuruma-hidrolik-ekolojik rötreye örneği [83]
(Photo 4. Example of drying (hydraulic-ecological) shrinkage)



Kuruma rötresinin betonun yüzeyinde ve alt bölgelerinde farklı miktarlarda olması özellikle plaka betonlarda kıvrılmaya neden olur. Bu da rötrenin neden olduğu çatlakların dışında, trafik yükü ve beton plağının kendi ağırlığının bükülmüş beton plağını zorlamasıyla ilave çatlaklar oluşacaktır [17]. Kaplama betonda üst kısım ile alt kısım arasında farklı kuruma sonucunda betonda kıvrılma meydana gelmiştir.

Kuruma rötresi, üretimi izleyen gün başlar ve 5-6 ay süreyle yavaşlayarak devam edebilir. Kuruma rötresinin nedenini açıklayan kılcal borular, jel teorileri gibi aşağıda özetlenen varsayımlar vardır. Sertleşmiş çimento hamuru jel yapıdadır. Yani katı taneciklerin adsorbe ettiği su molekülleri, bu tanecikleri bir arada tutan, bağlayan elektrostatik kuvvetleri oluştururlar. Adsorbe su tabakası incelidikçe taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler artmakta, su tabakası kalınlaştıkça azalmaktadır. Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta adsorbe su tabakası incelenerek ve taneler yaklaşarak hacim azalmaktadır. İlginç olan, büzülmenin herhangi bir dış yük altında olmamasıdır. Bir dış yükleme halinde jel suyunun hareketi hızlanacak ve çimento hamurunun boyutları daha da küçülecektir. Büzülen çimento hamuru tekrar suya batırıldığı taktirde adsorbe su tabakası kalınlaşıp, taneler birbirinden uzaklaşır. Sonuçta hacim artar ve bu olaya da şişme adı verilir. Çimento hamurunun tamamen su içinde bulunması halinde görülen şişme olayı mutlak değer olarak rötreden azdır. Beton art arda kuruma ve ıslanmaya maruz bırakılırsa rötne ve şişme olayları peş peşe meydana gelir.

Özkan ve Atiş'in yaptığı deneysel çalışmalarda (2017), silis dumanı katkılı harçlarda kuruma rötresinin, silis dumanı ikame oranından ve S/B oranından oldukça etkilendiği; S/B oranının 0.25 ve 0.30 olduğu harçlarda, %40 silis dumanı ilavesi hariç diğer ikame oranlarında rötreyi azaltıcı etkisi belirgin olduğu fakat S/B oranının artması ile silis dumanının rötreyi azaltıcı etkisi düşük seviyelerde kaldığını gözlemlemişlerdir [55].

Khayat ve Aitcin (1992), silis dumanı ikame oranlarının %0.5, 10 ve 25 olan betonların kuruma rötresinin incelendiği çalışmada S/Ç oranı 0.60'dan küçük betonlarda önemli bir fark görülmemiştir. Bunun yanı sıra %25 silis dumanı ilaveli betonlar silis dumanı katılmadan üretilenlere göre daha büyük kuruma rötresi değerlerini vermiştir [36].

Rao (2001), harçlarda uzun dönem kuruma rötresi üzerine silis dumanının ve agrega çapının etkisini araştırmıştır. Silis dumanın çok yüksek puzolanik aktivitesi ve incelik mekanizması nedeniyle 28 günlük erken dönemdeki kuruma rötresinde etkili olduğunu ve silis dumanı ilavesi ile bu dönemdeki kuruma rötresinin arttığını bildirmiştir. Ancak 365 günden sonra bu etkinin önemli olmadığını, harç numunelerin yaşlarıyla birlikte kuruma rötresindeki artışın düştüğünü, agrega çapının kuruma rötresi üzerinde oldukça önemli rol oynadığını agrega çapındaki artışın kuruma rötresini azalttığını ifade etmiştir [65].

Jianhui ve ark. tarafından yapılan çalışmada (2017), boşluklu çok ince mineral malzemeler kullanılarak dahili (kendi kendine) kürlenmenin otojen rötreyi azaltmada etkili bir yöntem olduğunu, yüksek performanslı çimento esaslı malzemelerin kuruma rötresinin yüzey porozitesine bağlı olarak suyun buharlaşması ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir [33].

Sonuç olarak, kuruma büzülmesi, sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması (betonun kuruması) sonucunda yer alan büzülmeyi ifade eder. Doygun olmayan hava ortamına bırakılan sertleşmiş betonda suyun uzaklaşması kuruma büzülmesine

neden olur. Bu hareketin bir kısmı kalıcı bir kısmı ise geri dönebilir cinstendir. Yaygın beton sınıfları için kalıcı olmayan nem hareketi büzülmenin yaklaşık %40-70'i kadardır. Ancak bunun, ilk kuruma başlangıcından önceki yaşada bağlı olduğunu da unutmamak gerekir.

Örneğin beton kurumaya maruz bırakılmadan önce tamamen hidrate olacak şekilde kr edilirse kalıcı olmayan nem hareketi kuruma büzülmesinin büyük bir kısmını teşkil edecektir. Diğer taraftan eğer kurumayı karbonasyon takip ederse imento hamurunda nem hareketi söz konusu olmaz ve dolayısıyla kalıcı ve geri dönmez büzülme daha fazla olur.

Nem hareketi beton bileşimine ve ilk kuruma başlangıcındaki hidratasyon derecesine bağlıdır. Genel olarak hafif beton normal betona nazaran dahi yüksek bir nem hareketi gösterir. Bzlmenin geri dönmeyen kısmı fiziksel olarak tutulmuş suyun uzaklaşmasıyla imento jelinde oluşan ilave fiziksel ve kimyasal bağlarla ilgilidir. Bir önemli hacimsel büzülme meydana getirmez [93].

2.5. Termik Rötre (Thermal Shrinkage)

Kütle betonlarında iç-dış sıcaklık farkıdır. Prizi sona eren ve sertleşmeye başlayan betonda, hidratasyon ısısının tüm kütleyi ısıtmaya yetecek oranda artamaması sonucunda kütle soğuyor ve termik büzülme oluşuyor. 1-2 gün içinde ortaya çıkan rötre özellikleri baraj gibi kütle betonlarında önemli sorunlar çıkarır. Bu nedenle termik rötre, çimentonun hidratasyon ısısı ile ilişkilidir.

i kısımdaki beton yavaş, dış kısımdaki beton hızlı soğur. Sonuçta dış kısımdaki betonun büzülmesi önlenmiş olur. Bunun sonucunda betonda çekme gerilmeleri oluşur ve çekme mukavemeti zaten çok az olan beton çatlar. Termik rötre çatlakları geniş ve derin olur. Zamanla daha da derinleşirler. Bir yılda 1.5m derinliğe varabilen çatlak yapıyı da hasara uğratır. Baraj yapımlarında beton içinde soğutma su boruları geçirilmesi, agregaların, suyun soğutulması gibi yöntemler termik rötre yüzündendir (Resim 5).



Resim 5. Termik rötre rnekleri [84]
(Photo 5. Example of thermal shrinkage)

Termik rötreyi artıran etkilerden bazıları şunlardır;

- Hidratasyon ısısı yüksek imento kullanımı
- Hızlı beton dökümü
- Kalınlığı fazla kütle betonu dökümüdür.

Termik rötreye karşı alınabilecek önlemlerden bazıları şunlardır;

- Hidratasyon ısısı düşük çimentonun kullanılması
- Beton dökümünün yavaşlatılması
- Betonun tabakalar halinde dökülmesi



- Beton içinden soğutma su borularının geçirilmesi
- Agregaya ve suyun soğutulması veya buz kullanımınıdır.

3. RÖTRE OLAYINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER (FACTORS AFFECTING SHRINKAGE EVENT)

Rötre; taze betonun içerisindeki suyun çevresel, fiziksel veya kimyasal nedenlerle azalması (buharlaştırılması) sonucunda meydana gelen büzülme olayıdır. Betonda rötre olayına neden olan faktörler aşağıda açıklanmıştır.

3.1. Çimento Faktörleri (Cement Factors) 3.1.1. S/Ç Oranı ve Hidratasyon Derecesi (W/C Ratio and Hydration Degree)

Su miktarında değişimler ve azalmalar zamana bağlı olduğundan rötre zamanla artar. Betondan ayrılan suyun rötreye neden olması gibi, betona katılan su da bir miktar genişlemeye neden olur. Ancak bu genişleme, rötre gibi tehlikeli değildir. Çünkü beton içerisinde genişleme sırasında basınç gerilmeleri oluşacakken, büzülme sırasında çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler betonun şekil değiştirme süresince ona karşı gelen unsurlar tarafından oluşturulur ve buna bağlı olarak mikro çatlaklar oluşur.

Rötrenin esas nedenini buharlaşarak uzaklaşan su oluşturmakla beraber, gerekli bazı önlemlere başvurularak buharlaşma önlenmiş olsa dahi, yani su kaybı olmasa bile, suların miktarında zamanla önemli değişimler olabilir. Beton karışımına başlangıçta konulan su tamamen buharlaşabilen su halindedir. Fakat hidratasyon olayının gelişmesi ile suyun bir kısmı buharlaşmayan su haline dönüşmeye başlar. Bu durumun bir sonucu olarak serbest su ile kılcallık suyu sürekli bir azalma gösterirken, buharlaşmayan suyun ve jel suyunun miktarı gittikçe artar. Suyun bir kısmı kimyasal olarak bağlanırken, bir kısmı da hidratasyon sonunda meydana gelen bileşiklerce jel suyu olarak tutulur.

Pratikte S/Ç oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Mukavemet agregaya hacminden çok S/Ç oranına bağlıdır. Bu nedenle rötreyi etkileyen faktör olarak mukavemeti öncelikle saymak olanak dışıdır. Ancak, düşük S/Ç oranı daha yüksek bir mukavemet ve daha az rötre verir. Agregaya/çimento oranlarının bir basitleştirilmesi olarak orijinal su içeriği tek değişken düşünülebilir [93].

3.1.2. Çimentonun Kimyasal Bileşimi (Chemical Composition of Cement)

Çimentoların çeşitli bileşenlerinin, kimyasal ve mineral katkıların rötre üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çok sayıda araştırma mevcuttur. Portland çimentolarının minör bileşenleri olan alkalilerin, çok düşük miktarlarına karşın betonların işlenebilirlik, dayanım, dürabilite ve rötre özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Yüksek performanslı betonların üretimi ile önem kazanan otojen rötre üzerinde de çözünen alkali miktarlarının etkisi olacağı kesindir, çünkü bu bileşenler Portland çimentolarının hidratasyon sürecini önemli derecede etkilemektedirler [58].

CaO, MgO ve SO₃ gibi genişletici maddelerin fazla miktarlarda bulunması halinde rötre azalır. Diğer taraftan, içerisinde az miktarda alçıtaşı, bulunan çimentolar fazla miktarda rötre yaparlar.

Mukesh ve ark. (2014), düşük karbon betonlarının üretilebilmesi için CEM II ve CEM V çimentolarının uygunluğuna yönelik yapılan çalışmada karbonatlaşma ve rötre özellikleri incelenmiştir. Aynı şartlarda kür edilen betonlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı katkılı CEM II ve CEM V çimentoları ile üretilen



betonların karbonatlaşma dirençlerinin herhangi bir mineral katkının kullanılmadığı CEM I çimentosu ile üretilen betonlara göre daha düşük olmuştur. Aynı şekilde uçucu külün kuruma rötresini azalttığı, yüksek fırın cürufunun ise geleneksel betonlarla benzer ve karşılaştırılabilir davranış sergilediği ancak silis dumanının özellikle erken dönemlerde kuruma rötresini artırdığı tespit edilmiştir [46].

Çimentolar içinde bulunan ve çözünebilen alkaliler sodyum (Na) ve potasyum (K) bileşenleridir. Bunlar çoğunlukla sülfat tuzlarıdır, mamafih cüz'i miktarda alkali aluminat ve karbonatlar da mevcuttur, hatta klinker öğeleriyle birleşik karmaşık alkaline tuzlara da rastlanır.

Alkalilerin hidrasyon sürecindeki ve hızındaki etkileri C3A'nın hidrasyonuna tesir etmeleri ile ortaya çıkar. C3A'nın hızlı hidrasyonu bilindiği gibi etrenjit oluşumu ile denetlenir, bunun için de arayer sıvısında $CaSO_4$ ve $Ca(OH)_2$ 'nin varlığı gereklidir. $CaSO_4$, Ca^{++} ve SO_4^{--} , iyonlarının birleşmesiyle oluşur, ancak K^+ ve Na^+ 'nin SO_4^{--} ile birleşme yetenekleri Ca^{++} 'nin yeteneğinden çok üstündür. Şu halde ortamda alkali iyon oranı yüksekse etrenjit teşekkülü için gerekli $CaSO_4$ miktarı azalacak ve çimentonun hidrasyon hızı denetlenmeyecek ve artacaktır. Ayrıca alkali oranı yüksek ortamda, çözülmüş $Ca(OH)_2$ miktarı da düşer. Bu gelişim de etrenjit oluşumunu kısıtlayacaktır [68 ve 89]. C3A'nın hidrasyonu denetlenebilirse alkali miktarı yüksek bile olsa son mekanik dayanımlarda düşme önlenemez, bunun için çimento üretiminde daha yüksek oranda $CaSO_4$ kullanmak gerekir.

Alkali varlığı C3A hidrasyonu ile birlikte C3S ve C2S'in hidrasyonlarını da hızlandırmaktadır. Böylece ilk günlerde çimento tarafından bağlanan su miktarı fazla olmaktadır. Ancak düşük su/çimento oranı ile üretilen betonlarda bu fazla suya duyulan gereksinme karşılanamadığından otojen rötreye yol açan mikroyapı oluşmaktadır. Hidrasyon hızının artması hidrasyon ısısı (HI) miktarını azaltmakta, ancak hidrasyon ısısı-zaman diyagramında birinci tepe noktasını orijine yaklaştırarak hidrasyon derecesini (HD) de düşürmektedir [92]. Bu olayda süperakışkanlaştırıcı türünün de önemli rolü vardır. Polikarboksilat türü SA'larda bu etkiler daha anlamlı değerlere varmaktadır.

Yüksek alkalili çimentolarda HI değerleri daha büyük yüzdelerle azalmaktadır. HD değerlerinde ise azalma düşük alkalili çimentolarda daha yüksek olmaktadır [92]. Çimentolardaki alkalilerin artması priz başlangıcı ve priz sonu sürelerini de kısaltmaktadır [18, 53 ve 54]. Bu olay ve hidrasyonun hızlanması, hidrate kristal ürünlerin boyutlarını doğal olarak büyütür ve homojen bir boyut kazanmalarını önler; gevşek ve boşluklu bir yapının meydana gelme olasılığı belirir. Çok düşük S/Ç oranıyla üretilen yüksek performanslı betonlarda (YPB) erken yaşta oluşan fizikokimyasal otojen rötreye (FKOR)'nin geçirimsiz bir yapı oluşturması ve suyla kütleme imkanının kaybolması ile yüksek alkalilerin boşluklu yapı meydana getirmesi süreçleri ters yönde gelişen faktörler olmaktadır. Ancak gecikmiş su küresi nedeniyle ortaya çıkan ve pratikte gözlenen bünyesel rötreye çatlama hasarları, içsel ürün oluşma sürecinin yüksek alkali sürecinden daha etkin olduğunu kanıtlamaktadır [58].

3.1.3. Çimentonun Dozajı (Dosage of Cement)

Rötreye beton içinde bulunan çimento miktarı ile birlikte artar. Yani çimentonun dozajı arttıkça rötreye artar. Yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretimiyle, bünyesel rötreye kavramı büyük bir önem kazanmıştır. Çimento miktarı yüksek, su/çimento oranı çok



düşük seviyelerde olan bu betonlarda (0.40'dan daha az) yeterince su bulunmamasından dolayı bünyesel rötrenin salt kimyasal faktör dışında kendiliğinden kurumanın (self desiccation) yol açtığı bir fiziksel etkiyle de arttığı gözlenmiştir.

Bünyesel rötrenin karakteri aslında kuruma rötresininkinden farklı bir olay değildir. İki olay da bağıl nemin düşmesiyle ortaya çıkarlar. Aralarındaki tek fark kuruma rötresinde suyun dışarıya buharlaşması, diğerinde ise içeride tüketilmesidir. Geleneksel betonlarda kuruma rötresine göre çok küçük mertebelerde kalan otojen büzülme yüksek performanslı betonlarda kuruma rötresine eşit mertebelere ulaşmakta [67], hatta daha yüksek değerler alabilmektedir [58].

3.1.4. Çimentonun Cinsi (Type of Cement)

Çimento tür ve inceliğinin rötreye üzerindeki etkinliği oldukça yüksektir. Çimento inceliği su miktarının artmasına neden olur ve dolayısıyla rötreye artar. Yine yüksek çimento içeriği, uzun süreli kuruma büzülmesini arttırırken harcın su bırakmasını (kusmasını) da arttıracaktır. Keza su içeriği üzerinde etkili kimi bileşenler büzülmeyi beklenenin çok ötesinde arttırabilirler. Diğer taraftan belirli bir agrega içeriği için, betonun büzülmesi aynı zamanda S/Ç oranının bir fonksiyonudur [30].

Çimento bileşiminin hamur rötresi ve dolayısıyla beton rötresi üzerindeki etkisi oldukça azdır. Yapılan gözlemlere göre, saf C3S ve C2S'ten oluşmuş hamurun rötresi, portland çimentosu kullanılarak hazırlanmış hamurun rötresine oranla daha az olmaktadır. Çimento hamurundaki küçük (ikincil) bileşenler, rötrenin esas kaynağı olduğu düşünülen C-S-H jelinin özelliklerini değiştirmektedir. Çimento yapısında bulunan kalsiyum hidroksitinin de rötreye üzerinde küçük bir etkisi bulunmaktadır. Öte yandan, çimento bileşimindeki alçı miktarının da rötreye üzerindeki etkisi dikkate alındığında, çimento hamurundaki rötreyi minimum seviyede tutmak için optimum alçı içeriği bulunmuştur [45].

Çimento inceliğinin artması ile çimento hamurunun rötresinde çok az artış olmaktadır. Ayrıca, daha hızlı hidratasyon yapan çimentolardan oluşan çimento hamurlarında, ilk günlerdeki rötreye miktarı bir miktar daha fazla olmaktadır. Beton üretiminde kullanılan S/Ç oranı yüksek olduğu takdirde çimento hamurunda yer alan kılcal boşluk miktarı daha çok olmaktadır ve kılcal boşluklardaki su, hava sıcaklığının yükselmesi ve/veya rölatif nemin düşük olması durumunda kolayca buharlaşabilmektedir. Buna göre genellemek gerekirse, sabit bir agrega hacmine sahip betonlarda su/çimento oranının yükselmesiyle kuruma rötresi artmaktadır [23].

Betonun rötresi üzerine çimentonun tipinin etkisi tam olarak ortaya çıkarılmış değildir. Yani çimentonun karmaşık bileşimleri yardımıyla betonun rötresinin tahmini olanağı mevcut değildir. Bununla birlikte SO₃'ün etkisinin önemli olduğunu gösteren veriler çoğunluktadır. Yine birçok araştırmacıya göre çimentodaki C2A içeriği rötreyi arttırmaktadır [93].

3.1.5. Çimento İnceliği (Cement Fineness)

Çimentoda incelik ne kadar fazla ise çimentonun dayanım gelişimi ilk yaşlarda o kadar hızlı olur. Çimento hamurundaki çimento tanelerinin etrafını saran su filminin ortalama kalınlığı S/Ç oranına ve çimento inceliğine bağlıdır. Çimentonun inceliği özgül yüzeyi ile tanımlanır.

İnceliğin artması rötreyi artırır. İnce çimento kullanımı daha yoğun bir içyapı oluşumuna neden olmakta ve oluşan kılcal boşlukların



çapları daha ince olmaktadır. İnce kılcal boşluklar da otojen rötreye büyüklüğünün artmasına sebep olmaktadır. Öte yandan birçok araştırmacıya göre çimento inceliği arttıkça rötrenin arttığı ifade edilmektedir. Örneğin; inceliği 3000-5000cm²/g arasında olan çimentoların rötresi, inceliği 3200-4300 cm²/g arasında olan çimentoların rötresinden %15 daha fazladır [93].

Bentz ve diğ. (2001), yaptıkları çalışmada, çimento taneleri boyut dağılımının, eşit S/Ç oranlı çimento hamurlarının bünyesel rötrelere üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada ince tanecik boyutuna sahip numunelerde bünyesel rötreye miktarının daha yüksek olduğunu gözlemlerken iri tanecik boyutlu çimento ile üretilen numunelerde ise erken yaşlarda rötrenin aksine bir miktar genleşme olduğunu belirlemişlerdir [15].

Hidratasyon kinetiğini yönlendiren karma oksitlerin de çimento hamurunun bünyesel rötresini de etkilediği, araştırmalar sonucunda ispatlanmıştır. Birçok araştırmacı çimentonun karma oksitlerinden C3S ve C2S'in otojen rötreye üzerinde çok güçlü bir etkisinin olmadığını, bunun yanında C3A ve C4AF miktarlarının özellikle de C3A/C4AF oranının bünyesel rötreye üzerinde önemli etkilerinin olduğunu ve bünyesel rötrenin bu oranın düşmesiyle azaldığını vurgulamaktadır. C3A ve C4AF'nin etkileri C3S ve C2S'e göre 10~20 mertebesinde olabilmektedir. Justness ve ark. ise C3A'nın yanında C3S'in de reaktif bir faz olması nedeniyle otojen rötreyi etkilediğini ileri sürmektedirler. Araştırmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en etkili çimento bileşeninin erken hidratasyon aşamasında oldukça reaktif olan C3A olduğu anlaşılmaktadır [58].

Portland çimentolarının minör bileşenleri olan alkaliler, çok düşük miktarlarına karşın betonların işlenebilme, dayanım, durabilite ve rötreye özelliklerini önemli ölçüde etkilerler. Genellikle negatif yönde olan bu etkileri değişen çimento üretim teknikleri ve ekonomik zorluklar nedeniyle alkali miktarlarını indirgeyerek bertaraf etmek olanaksızdır [4 ve 92]. Alkali agrega reaksiyonu, priz süreçleri, reoloji, terleme, rötreye-genleşme, mekanik dayanım, karbonatlaşma, çiçeklenme gibi konularda alkalilerin etkileri uzun yıllardır incelenmektedir [4 ve 92].

YPB'ların üretimi ile önem kazanan otojen rötreye üzerinde de çözünen alkali miktarlarının etkisi olacağı kesindir, çünkü bu bileşenler portland çimentolarının hidratasyon sürecini önemli derecede etkilemektedirler [4, 58 ve 59].

3.1.6. Çimento Hamurunda Bulunan Kılcal Su İle Jel Suyu (Capillary Water in Cement Paste and Gel Water)

Çimento hamurunda bulunan kılcal su ile jel suyunun miktarlarının değişmesi rötreye neden olur. Rötrenin esas nedeni beton içinde katılaşmış olan sudur. Çimento hamurunda bulunan su, buharlaşamayan su ve buharlaşabilen su olarak iki grup altında toplanabilir. Buharlaşamayan su hidratasyon ürünleri tarafından kimyasal ve fizikokimyasal olarak bağlanan sudur. Buharlaşabilen su ise, çimento hamurunun kapiler ve jel boşluklarında bulunan sudur. Bu boşlukların durumuna göre buharlaşabilen su; serbest su, jel suyu ve kılcallık suyu halinde bulunur. Bu sular farklı şekil ve zamanda buharlaşır [20, 21 ve 57].

3.2. Beton Faktörleri (Concrete Factors)

3.2.1. Agrega Etkisi (Aggregate Effect)

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Agreganın beton yapımında ekonomik ve teknik yönlerden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Betonda



agrega kullanılması, sertleşme ve beton hacim değişikliğini önlemekte veya azaltmakta, ayrıca çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığını artırmaktadır. Beton içinde hacimsel olarak %60-75 civarında yer işgal eden agrega önemli bir bileşendir. Agregalar tane boyutlarına göre ince (kum, kırma kum gibi) ve kaba (çakıl, kırmataş gibi) agregalar olarak ikiye ayrılır. Beton agregalarında elek analizi, yassılık, özgül ağırlık ve su emme gibi deneyler uygun aralıklarla yapılarak kalite sürekliliği takip edilmelidir. Betonda kullanılacak agregalar TS 706 EN 12620'ye uygun olmalıdır.

Agregalar çimento hamurunun rötresini frenler. Diğer parametrelerin etkisinin az olduğu bilinmektedir. Yüksek kalitede sert yoğun agregaların seçilmesi halinde S/Ç oranı 0.40'dan büyük iken betonun rötresi agreganın rijitliğinden bağımsızdır. Bununla birlikte işlenebilirlik, agrega granülometrisi ve en büyük agrega boyutu da rötre üzerinde etkilidir [93].

3.2.2. Agrega Sertliği (Aggregate Hardness)

Beton agregası, beton veya harç yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen, organik olmayan, doğal veya yapay malzemenin genellikle 100 mm'yi aşmayan büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış tanelerin oluşturduğu bir yığındır. Beton oluşturulan malzemeler içerisinde en büyük orana (yaklaşık %75) sahip olan agrega (kum, çakıl, kırmataş), doğal kaynakları giderek tükenen ve standartlara uygun, temiz, kaliteli örneklerinin bulunması güç bir malzeme olarak, hazır beton sektöründeki stratejik önemini her geçen gün artırmaktadır [79].

Beton yapımında agrega kullanılmasının tek nedeni daha ekonomik beton üretmek değildir. Agrega betonun teknik özelliklerine de önemli katkılarda bulunmaktadır [23]. Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, gözenekliliği, su geçirgenliği, mineral yapısı, tane şekli, gradasyonu, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, en büyük tane boyutu, elastiklik modülü, beton özelliklerini etkilemektedir [44]. Agrega elde edilmiş sekline göre, genel olarak kırma agrega ve doğal akarsu yatağından temin edilmektedir [69].

Beton agregalarının özellikleri TS706 EN 12620 standardında belirlenmiştir. Standarda göre beton agregaları; sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları, zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür vb.), basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları, toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri, yassı ve uzun taneler içermemeleri, çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleri ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir.

3.2.3. Agrega Yapısı (Aggregate Structure)

Agrega türü, büyüklüğü ve ağırlığı rötre üzerinde etkilidir. Artan agrega büyüklüğü ve miktarı ile elastisite modülü hacimsel büzülme azaltmaktadır. Ancak agrega türünün rötre üzerine etkisi kimi zaman agrega büyüklüğünün etkisine göre daha büyüktür. Belirli bir agrega içeriği için, betonun büzülmesi aynı zamanda su-çimento oranının bir fonksiyonudur [30].

Agreganın kısıtlayıcı etkisinden ötürü betonun kuruma rötresi, salt çimento hamurunun rötresinden daha az olmaktadır. İstisnalar dışında agregalar, değişen nem koşulları altında boyutsal olarak kararlı kalmaktadırlar. Agregalarca sağlanan kısıtın derecesi agreganın sertliğine ve maksimum iri agrega çapına bağlı olmaktadır.

Maksimum agrega çapı arttıkça, kuruma rötresi nedeniyle hamur-agrega arayüzeyinde oluşan gerilmeler de artmaktadır. Bununla birlikte, artan iç gerilmeler, arayüzey bölgelerindeki çatlak miktarını arttıracaktır. Hafif agregalar -çoğunlukla- boyutsal olarak



kararlı halde bulunmaktadır. Buna karşın, hafif agregalarla yapılan betonlarda meydana gelen rötreye, agregaların sahip olduğu düşük elastisite modülü nedeniyle normal betonlardakinden daha fazla olmaktadır.

Agrega miktarı ve sertliğinin bileşke etkisi, $\epsilon_b = \epsilon_h(1 - A)^n$ ampirik formülüyle ifade edilmektedir.

Bu denklemde:

ϵ_b, ϵ_h : Sırasıyla betonun ve hamurun rötreye deformasyonları

A: Betondaki agrega miktarı

n: 1.2 ile 1.7 arasında değişen katsayıları göstermektedir [45].

Otojen rötreye betonun hamur fazında oluşan bir olay olduğundan, agregaların katılmasıyla çimento hamurunun azalması sonucunda otojen rötrenin düşmesi beklenen bir olaydır. Burada hamur miktarının azalmasının yanında kuruma rötresinde olduğu gibi agregaların varlığının hamurun rötreye deformasyonunu sınırlaması da önemli bir etkidir. Agregaların su emme kapasitesi arttıkça betonun otojen rötresindeki düşüş oranı artmaktadır. Agregaların içinde hapsolmuş su, hidratasyon sırasında kullanılmakta ve menisklerde oluşacak gerilmelerin artmasını engellemektedir. Hafif agrega kullanımının betonun otojen rötresini azaltma yönünde diğer agregalara nazaran daha üstün olduğu belirtilmektedir. Bunun nedeni hafif agregalar boşluklu yapıları sebebiyle içlerinde fazla miktarda su bulundurabilmekte ve rezervuar gibi davranarak hidratasyon sırasında depoladıkları suyu ortama salarak kendiliğinden kuruma olayını önemli miktarda engelleyebilmektedirler. Rötreye maksimum azalmayı elde edebilmek için kullanılan hafif agreganın suya doygun olması gerekir. Bununla birlikte yüksek performanslı betonlarda hafif agrega kullanımının dayanımlarda yüksek oranda düşüş meydana getirebilmesi gibi bir dezavantajı vardır [13, 29, 37, 58, 71, 72 ve 73].

3.2.4. Agregas / Çimento Oranının Etkisi (Effect of Aggregate / Cement Ratio)

Beton teknolojisinde diğer önemli bir değişken agrega/çimento oranıdır. Normal ve hafif betonlar ile bunları oluşturan harç ve çimento hamuru fazlarının zamana bağlı davranışlarında rötreye ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada şu sonuca varmışlardır;

- Agregas/çimento oranı arttıkça beton daha az rötreye yapar.
- Aynı agrega/çimento oranında hafif betonlar ile bunların harç fazları daha fazla rötreye değerine sahiptir.
- Aynı agrega/çimento oranında, su/çimento oranı yüksek olan beton, harç ve çimento hamuru daha fazla rötreye yapar [93].

Betonun su ihtiyacını artıran en önemli parametre olan çimento aynı zamanda kimyasal rötreye de sebebiyet vermektedir, bu sebeple hacim kararsızlığına sebep olan çimento mümkün olduğunca az kullanılmalı, agrega kısmı arttırılmalıdır. İnce malzeme miktarının artması çimentoyu büzülmeye daha elverişli hale getirmektedir, bu sebeple mümkün olduğunca agreganın kaba seçilmesinde fayda vardır [81].

3.2.5. Agregas-Çimento Hamuru Kenetlenmesi-Aderansı (Aggregate-Cement Pulp Interlocking-Adherence)

Hidratasyon olayı sonucunda çimento hamuru ile agrega arasında oluşan kenetlenmenin (aderans) özellikleri betonun genel mekanik davranışlarını ve dayanıklılığını olumlu yönde etkiler. Agregas taneleri ile çimento hamuru arasındaki kristal yapı yönünden bir süreklilik temini bağlantıyı olumlu yönde etkileyen önemli bir faktör olmaktadır. Buna, beton literatüründe, epitaksi denilmektedir. Suyla reaksiyona giren çimentoda ilk çözünen madde $Ca(OH)_2$ olmakta ve bunun



belirli konsantrasyonda bulunması silikat ve alüminat jellerinin oluşmasına olanak vermektedir. Agregaların yüzeylerine çökelen ve bağlantıyı oluşturan da hegzagonal kireç kristalleridir. Agreganın kireçle aynı kimyasal yapıda olması bu kristal oluşumunun sürekliliği bakımından büyük katkısı vardır. Kısaca, CaCO_3 kökenli agregalar (kireçtaşı, dolomit, mermer) en yüksek "epitaksial bağ" oluşturan agregalardır [8].

3.2.6. Beton Yüzey Alanı-Hacim Oranı

(Concrete Surface Area-Volume Ratio)

Püskürtme betonun kür edilmesi özellikle önemlidir. Yüzey alanı/hacim oranı yüksek olduğundan hızlı kuruma riski yüksektir. Püskürtme betonun 5MPa basınç dayanımına ulaşmaya kadar dondan korunması önerilmekte, eski betona aderansının en az 1MPa, kaya yüzeylere aderansının ise en az 0.5MPa olması gerekmektedir. Yüzey alanı-hacim oranı yüksekliği ileri düzeyde kurumaya ve dolayısıyla rötrenin fazlaşmasına yol açmaktadır [30].

3.2.7. Beton Yapının Biçimi ve Büyüklüğü

(Form and Size of Concrete Structure)

Beton numunenin boyutu ve şekli, su kaybı hızını dolayısıyla kuruma rötresi hızını ve şiddetini belirlemektedir. Suyun katettiği difüzyon mesafesinin de nem kaybı hızı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Örneğin; kütle betonun yüzeyinden 75mm derinlikteki bir bölümün nem dengesine ulaşabilmesi ilk 1 ay içerisinde gerçekleşmektedir. Bu süre, 225 mm için 1 yıl, 600mm içinse yaklaşık olarak 10 yıl olmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde numunedeki "hacim/yüzey alanı" oranının oldukça önemli olduğu görülmektedir ve betondaki bu oran arttıkça daha az rötme meydana gelmektedir [23 ve 61].

3.2.8. Betonun Yaşı (Age of Concrete)

Rötme uzun bir sürede meydana gelir, bazı hareketler 28 yıl sonra bile gözlemlenebilir. Fakat uzun süreli rötme kısmı muhtemelen karbonatlaşmadan dolayı oluşan rötredir. Rötme miktarındaki artış zamanla hızlı bir şekilde azalmaktadır. 20 yıllık rötrenin %14-34'ü iki hafta içinde, 20 yıllık rötrenin %40-80'i üç ay içinde, 20 yıllık rötrenin %66-85'i ise bir yıl içerisinde oluşmaktadır.

Karbonatlaşma derinliği betonun yaşı ile artmakta, artan ortalama basınç dayanımı ile de azalmaktadır. Örneğin; $f = 12\text{N/mm}^2$ dayanımlı beton 5 yıl sonunda karbonatlaşma derinliği yaklaşık 25mm'ye ulaşmakta (eğer pas kalınlığı 25mm ise) donatı korozyon tehlikesine açık olacaktır. Daha açık deyişle donatı $t > 5$ yıl'dan sonra korozyon tehlikesiyle karşı karşıyadır. Beton dayanımı $f = 30\text{N/mm}^2$ olduğunda aynı atmosfer koşullarında karbonatlaşma derinliğinin donatı payına ulaşması ($d = 25\text{mm}$) için geçen olası süre verilen abaktan $t = 40$ yıl elde edilir [8].

3.2.9. Nem İçeriği (Moisture Content)

Büzülmeye etkileyen çevre koşulları içerisinde en önemlisi kuşkusuz nemdir. Bağlı nem özellikle %50'nin altına düştüğü zaman betondaki suyun buharlaşması sonucu hidrasyon için gerekli su kalmayabilir. Beton numuneler üzerinde yapılan deneyler sırasında uygulanan kürün amacı budur. Betonarme yapılarda ise betonun sulanmasının amacı bu su kaybının önüne geçerek betonarme yapı oluşturan elemanın normal dayanımına kavuşmasını sağlamaktır [50].



3.2.10. Betonda Porozite (Porosity in Concrete)

Betonun boşluk yapısı klor iyonları gibi zararlı maddelerin beton içerisine taşınımında ve zarar vermesinde belirleyicidir. Klor iyonlarının beton içerisine girmesi ile çelik zarar görmekte ve korozyona uğramaktadır. Yüksek sıcaklıklar sonucunda beton içyapısı daha boşluklu hale gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda hızlı gelişen çimento hidratasyonu sonucu olarak hidratasyon ürünleri uniform şekilde dağılamamakta ve bu durum daha büyük boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise hidratasyon daha yavaş gelişmekte ve hidratasyon ürünleri daha uniform dağılarak daha boşluksuz bir içyapı oluşmasını sağlamaktadır. Böylece klor iyonları gibi zararlı maddelerin betona taşınımı zorlaşmaktadır.

Beton bünyesindeki boşluklar, C-S-H jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında çimento hamuru ile çimento hamuru agrega ara yüzünün boşluk yapısı bu durumdan etkilenmektedir. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve boşluk boyutunun dağılımında değişikliklere neden olmaktadır [7].

3.2.11. Betonun Bakımı (Kürü) (Concrete Care (Curing))

Betonun bakımı bir başka deyişle betonun kürü, beton yerleştirildikten sonra veya beton ürünlerinin imalatından sonra oluşabilecek su kaybını engellemek ve hidratasyon reaksiyonlarının uygun şekilde ve zamanda gerçekleşmesini sağlamaktır. Çimento hidratasyonu günlerce, haftalarca hatta aylarca sürmektedir.

Betonda arzu edilen özelliklerin gelişebilmesi için betonun, yerleştirilmesi ve yüzeyinin perdahlanması işlemlerinden hemen sonra, yeterli süre istenen nem içeriğinin ve belirli ortam koşullarının sağlanması işlemine bakım (kür) adı verilir. Çimentonun hidratasyon sürekli olabilmesi için ortamda suyun bulunması gerekmektedir. Bağıl nemin %80 altına düştüğü durumlarda hidratasyon oldukça yavaşlamakta, %30'un altında ise pratik olarak durmaktadır [77].

Hidratasyon reaksiyonunun devamı için yeterli miktarda su ve sıcaklık gerekmektedir. Bu koşullar sağlanamadığı takdirde betondan beklenen dayanım ve dayanıklılık (durabilite) elde edilemez. Betonun su kaybederek kurumasını önlemek, dolayısıyla çimentonun hidratasyonunu sürdürmesi için üç yol izlenir:

- Su geçirmeyen (naylon-polietilen) bir örtü ile beton yüzeyi kapatılır.
- Sürekli olarak betonun yüzeyinin nemli kalması sağlanır.
- Kimyasal kür katkıları kullanılarak beton yüzeyindeki su kaybı azaltılır [78].

Betona uygulanan kür sıcaklığının yüksek olması, normal sıcaklıkta kür uygulanan betonların dayanımları ile karşılaştırıldığında, ilk günlerdeki dayanımın yüksek olmasını sağlamakla birlikte, daha sonraki günlerdeki dayanımın daha düşük olmasına yol açmaktadır. Hem betonun ilk günlerde kazanacağı dayanımın yüksek olmasını sağlamak, hem de daha sonraki günlerde betonun çok düşük dayanım göstermesini bir ölçüde engellemek amacıyla, betona uygulanan buhar kürü değişik ara sürelerle ve değişik sıcaklıklarda yerine getirilmektedir [22].

Atmosferik basınçlı buhar kürünün kullanılmasındaki en büyük amaç beton elemanın bir an önce dayanım kazanmasını ve böylece ekonomiklik sağlamak olduğundan, çoğu zaman buhar kürü devresinin süresi, özellikle bekleme süresi, uygulamada yeterince uzun tutulmamaktadır. Oysa bekleme süresinin betonun ilerideki performansına önemli etkileri olmaktadır [22].



Buhar kürünün beton özelliklerine etkileri üzerine yaptığı çalışmada uzun süreli nem ortamında kalan betonun nihai dayanımlarının buhar kürü uygulanan numunelerden fazla olduğunu belirtmiştir [27]. Çalışma sonucunda betona buhar kürü uygulamalarının betonun uzun süreli dayanım özelliklerini bir miktar azalttığı anlaşılmaktadır.

Buhar kürü uygulaması yapılacak beton elemanlarda portland çimentosu ile birlikte bir miktar ince taneli silis malzemede bulundurulması gerekmektedir. Aksi durumda, buhar kürüne tabi tutulan elemanın ilk günlerdeki davranışı normal betonunkine benzemesine rağmen buhar kürü süresinin ilerlemesiyle betonda oluşan C-S-H jelleri amorf yapıdan kristal yapıya dönüşerek kararsız hale gelmekte, uniform olarak dağılım göstermeyip boşlukları dolduramamakta ve beton dayanımını düşürmektedir [38].

Beton kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biri de betonun kür edilmesidir. Esasen betonu kür etmek, kritik erken dönemde çimento hidratasyonu için gerekli rutubetin ortamda bulunmasını sağlamak demektir. Bu, ya betonun su kaybını engellemek ya da yüzeye ilave su vermekle sağlanır. Çimentonun hidrate olması için gereken su, yüzey buharlaşması nedeniyle kaybolacağı için, kür gereklidir. Betonun yüzeyden kaybedeceği su geri verilmediği takdirde, bu kayıp, istenmeyen plastik deformasyonlara ve çatlaklara yol açacaktır.

Betonun kürü için açık beton yüzeyleri ve kapalı beton yüzeylerine göre değişiklik gösteren şekliyle kür edilmesi önerilir. Buna göre; açık beton yüzeylerin kürü için aşağıdaki hususlar oldukça önem arz etmektedir.

- Beton kürü amacıyla yüzey bitirme işlemleri tamamlandıktan sonra beton yüzeyi politin veya geçirimsiz bir örtü malzemesi ile kaplanabilir. Bu şekilde beton yüzeyindeki buharlaşma veya su kaybı önlenmiş olur. Beton kürü hakkında dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi, betonun ilk prizini almadan önce yüzeye su verilmemesi konusudur.
- Beton kürü işlemi için yeterli miktarda veya kalitede su bulunmadığı durumlarda beton yüzeye kür maddesi uygulanmalıdır. Kür maddesinin de uygunluğu da önceden saptanmalıdır.
- Su ile beton küründe değişik prosedürler uygulanabilir. Betonun devamlı ıslak tutulması bu işin esasıdır. Beton yüzeyinin ara ara kuru kalmasına fırsat verilmemelidir. Suyu yüzeyde havuzlama işlemi en uygundur. Bunun için betonun kenar kalıpları yüzey seviyesinden biraz daha yukarıda çakılır. Islak çuval veya ıslak kum kullanılması halinde bile yine bir politin örtü üste konulmalıdır. Kür suyu bu tabakanın altından verilerek çuval veya kum devamlı ıslak tutulur.
- Taze betonun kürlenmesi süresinin kullanılan çimento cinsi, karışım oranları, beton elemanlarının şekli ve boyutu ve çevre şartları dikkate alınarak önceden belirlenmesi gerekir. Genel olarak, devamlı su içinde tutulan betonun 28 günlük basınç dayanımının %70'ini elde edilene kadar kür işlemi sürdürülmelidir.
- Betonda ani kuruma ve hava sıcaklığının ani değişmesi kuruma büzülmesi ve ısıl çatlakların olasılığı bakımından istenmeyen durumlardır.
- Kür işlemi bittikten sonra beton yavaş bir şekilde güneş ışınları ve rüzgardan korunarak kurutulmalıdır.

Kapalı yüzeylerin kürü için de aşağıdaki hususlar oldukça önem arz etmektedir.

- Kolonlar için kullanılan dikey kalıplar, beton kalıp alınmasına karşı yeterli dayanımını almadan sökülmemelidir. Burada da



çimento cinsi, karışım oranları ve çevre koşulları önemli rol oynar. Sıcak iklimlerde bu müddet kısa olabilir. Yine de 24 saat dolmadan kalıp sökmemelidir.

- Kür işlemi kalıbın sökümünden hemen sonra başlatılmalıdır. Yatay yüzlerin aksine, dikey yüzlerin su ile kürü zor olur. Bu durumlarda yüzeye kür maddesi uygulanması en iyi seçimdir. Kür maddesinin seçimindeki dikkat burada da geçerlidir.
- Şayet su kürü yapılacaksa yüzeyler önce ıslak çuvallar ile sonra bu çuvallar ıslak politin ile veya geçirimsiz bir başka örtü malzemesi ile kaplanır. Devamlı su ilavesi ile çuvallar ıslak tutulur.
- Su kürü, beton şart koşulan basınç dayanımının %70'ini alana kadar devam ettirilir [76].

3.3. Çevresel Faktörler (Environmental Factors)

3.3.1. Nem-Rutubet Yüzdesi (Moisture-Moisture Percentage)

Mevsimsel nem değişikliklerine maruz kalan yapılar büzülme ve şişme gerçekleştirebilir. Havanın rutubetinin düşük olması buharlaşmayı kolaylaştırdığından rötreyi artırır. Betondaki rötreye oranı bağıl neme bağlıdır. Bağıl nem %40 veya daha az olduğunda büzülme maksimum değere sahip olur. Genelde bir yılsonunda meydana gelen büzülme şekil değiştirmesi 2×10^{-4} - 8×10^{-4} civarındadır. Betonun yeniden ıslatılmasıyla kısmen geri kazanılabilir.

Prizini yapmış çimento hamuru rutubet derecesi düşük bir ortamda tutulduğu vakit önce serbest su buharlaşarak ayrılır. Bunu aynı şekilde kılcallık suyu ve jel suyunun buharlaşarak çimento hamurunu terk etmesi izler. Böylelikle havada bırakılan çimento hamurundan veya betondan suların ayrılmasıyla malzemenin ağırlığında bir azalma olur. İşte bu ağırlıktaki azalma veya su kaybı betonun rötreye yapmasının başlıca nedenidir.

Beton dökümü sırasında havadaki nemin düşük olmasının rötreye etkisi bulunmaktadır. Örneğin; nem oranı %90'dan %10'a düşerse buharlaşma miktarı 8 kat, %90'dan %50'ye düşerse 5 kat artmaktadır. Havanın rüzgarlı olması, beton dökümü yapılan sahanın rüzgara açık olması, rüzgar hızı 0'dan 40km/h'e yükselirse buharlaşma miktarı 9 kat, 0'dan 6km/h'e yükselirse 4 kat artmaktadır.

3.3.2. Ortam Şartları (Environmental Conditions)

Yüksek hava sıcaklığı ile birlikte nemsiz ve rüzgarlı hava beton dökümü için en elverişsiz ortamdır. Ortam koşullarının çimento ve betonların yaptıkları rötreye üzerinde gayet önemli etkileri vardır. Bunlardan özellikle havanın rutubetinin etkisi büyüktür. Havanın rutubet derecesi ne kadar düşük ise buharlaşma o kadar fazla olmaktadır. Diğer taraftan sıcaklık derecesinin artması da buharlaşmayı artırdığından, rötreye bu durumda da büyük değerler alır. Sonuç olarak, rölatif nem miktarının azalması ve/veya ortam sıcaklığının yükselmesi betondan kaybolan su miktarını yükseltmekte, dolayısıyla, rötrenin artmasına neden olmaktadır [23 ve 61].

Sıcak ve rüzgarlı havalar, beton dökümü için uygun olmayan, istenmeyen bir durumdur. Beton dökümünde gerekli özen gösterilmezse taze betonda çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar betonun kalıba yerleştirilmesini izleyen ilk 30dk ile 5 saat arasında genelde döşeme gibi geniş yüzeye dökülen betonlarda görülür. Bu çatlaklar 10cm'e erişen derinlikte ve birkaç cm'den başlayarak 2m'ye varan uzunluklarda olabilir. Oluşan çatlaklar betonun mekanik mukavemeti ve özellikle dayanıklılığı açısından zararlıdır. Taze beton çatlakları farklı oturmalardan veya plastik rötreden kaynaklanabilir [92].

3.3.3. Ortam Sıcaklığı (Ambient Temperature)

Beton sıcaklığının artması erken dayanımı arttırır. Bunun nedeni hidratasyon reaksiyonunun sıcaklıkla hızlanması ve daha fazla hidratasyon ürünü oluşmasıdır. Betonda erken dayanımı sağlayan C3S hidratasyonu sıcaklıkla hızlanır ve daha fazla ve daha yoğun C-S-H jeli oluşur. Beton sıcaklığının artması erken dayanımın aksine geç dayanımı bir miktar düşürür. Bunun nedeni ise erken yaşta sıcaklık nedeniyle oluşan ürünlerin çimento taneciklerinin etrafında çok yoğun ve geçirimi düşük bir tabaka oluşturmasıdır. Oluşan ürünler uniform bir dağılım taşımaz. Bu nedenle çimento tanecikleri tam olarak hidratasyona uğramamış olur. Mikroyapı da ise geçirimsizlik artar [80].

Çevre şartlarını oluşturan diğer kriter olan sıcaklık ise nemi değiştirdiği gibi 20 °C üzerine çıktığı zaman mukavemet artar ve priz hızlanır. Priz çimentoyu meydana getiren toz halindeki bağlayıcıların bir sıvıyla karıştırılmasından ve süspansiyon hale geldikten sonra geçirdiği çeşitli kimyasal tepkimeler sonucu katı hale gelmesi olayıdır [1].

Sıcaklık, nem ve rüzgar rötreye düzeyini etkilemektedir. Sıcaklık ve rüzgar hızının buharlaşma miktarını artırması rötreye miktarını da yükseltmektedir. Nispi nemin düşüklüğü rötreye miktarını artırırken yüksek nispi nem düşük rötreye neden olmaktadır [30]. Sıcaklığın yüksek olması halinde fazla miktarda buharlaşma olur. Bunun sonucunda da rötreye artar. Rötreye, sabit sıcaklık altında sertleşme ve kuruma sırasında dış yükten bağımsız olarak beton hacminde meydana gelen azalmadır. Havayı sıcak olması ve betonun doğrudan güneş ışığına maruz kalması neden olmaktadır. Hava sıcaklığı 10°C'den 38°C'ye yükselirse buharlaşma miktarı 7 kat, 10°C'den 21°C'ye yükselirse buharlaşma hızı 2 kat artmaktadır.

Dış ortam sıcaklığının hidratasyon süreci devam eden çimento hamuru üzerindeki etkilerini ikiye ayırabiliriz. Birincisi dış ortam sıcaklığının hidratasyon sürecini yavaşlatması veya hızlandırması, diğeri ise betonun genişlemesine veya büzülmesine sebep olarak hacim stabilitesi üzerinde etken olmasıdır. Dış ortam sıcaklığının bünyesel rötreye üzerindeki etkileri ise temel olarak çimento hamuru üzerinde olan bu iki etkinin süperpozisyonu olarak düşünülebilir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre bünyesel rötreye büyüklüğü dış ortam sıcaklığının artışıyla artmaktadır. Bunun en önemli sebebi hidratasyonun sıcaklığın artışıyla ivmelenmesidir. Bununla birlikte çimento türüne bağlı olarak bazı istisnai sonuçların elde edilebileceği de söylenmektedir [32, 39, 41 ve 58].

3.4. Beton Üretim Faktörleri (Concrete Production Factors)

3.4.1. Kürleme (Curing)

Beton sertleşmeye başlar başlamaz su ile kür edilmelidir. Kür süresi en az 4-7 gün olmalıdır. Beton yüzeyi devamlı nemli kalacak şekilde farklı metotlar ile kür yapılabilir. Sürekli olarak beton yüzeyine su püskürtülmesi mükemmel bir su ile kür yoludur. Eğer bu işlem aralıklarla yapılıyorsa beton yüzeyinin kuru kalmamasına dikkat gösterilmelidir. Hortumla beton yüzeyine saçılan su betonun yüzeyde oluşacak çatlamları yok denecek kadar azaltır. Bu sistemin tek dezavantajı maliyetidir. Sistemin uygun işlemesi için yeterli miktarda su ve tecrübeli uygulamacı gerekmektedir.

Kürleme şartları ve süresi rötreye miktarını değiştirmektedir. Günlük 4-5 kez sulama rötrenin azalmasını sağlarken havada kürlenme ya da 1-2 kez sulama aşırı rötreye ve çatlamalara neden olabilir. Sulama dışındaki ıslak veya polietilen örtü uygulamalarının yüksek rötreye değerleri verirken modifiye bal mumu reçinesinin düşük rötreye yol açtığı belirtilmektedir [30].



Narayanan ve Ramamurthy (2000) tarafından gaz betonun yapısı ve özelliklerine ilişkin yapılan bir derleme çalışmasında; gözenek oluşum ve kütleme yönteminin, betonun mikro yapı ve özellikleri üzerinde etkili olduğu, kimyasal bileşimin kütleme yöntemi ile değiştiği, yoğunluğun beton özelliklerini etkilediği, otoklav kullanımında kuruma büzülmesinin daha düşük ve otoklav kullanılmadığı durumdakinin dörtte birinden beşte birine kadar değiştiği ve havalandırılmış betonun iyi işlevsel performans özelliklerine sahip olduğuna değinilmiştir [47].

3.4.2. Mineral Katkılar (Mineral Additives)

Genel yaklaşım olarak fazla su kullanımı gerektiren katkıların büzülmeyi artırdığı ancak bazılarında bundan sapmalar olduğu her daim rötrenin artmadığı bilinmektedir. Diğer taraftan mineral katkılardan uçucu kül, su içeriğinde neden olduğu azalmaya bağlı olarak rötrenin azalmasına yol açmaktadır [30].

Günümüzde, beton üretiminde yaygın olarak kullanılan mineral katkılar yüksek performanslı, özellikle kendiliğinden yerleşen betonların ayrılmaz bir parçası olmuştur. Mineral katkıların bünyesel rötreye üzerindeki etkileri de çimentonun etkilerine benzer şekilde olmaktadır. Bu etkileri aynı şekilde fiziksel ve kimyasal özelliklerin etkileri olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Fiziksel özelliklerden en etkin olanı mineral katkının inceliğidir. İncelik arttıkça kılcal boşluk çapları küçülmekte ve buna bağlı olarak boşluklarda oluşan gerilmeler artmaktadır. Bu da bünyesel rötrenin fiziksel kısmının artmasına neden olmaktadır. Bu olay yüksek inceliği sebebiyle silis dumanı ve cüruf kullanımında daha belirgin gözlenmektedir. Silis dumanı gibi tanecik boyutu oldukça küçük olan mineral katkıların bünyesel rötreyi arttırmalarına karşın yine ince yapıda olan metakaolin kullanımının, gösterdiği genleşme eğilimi nedeniyle bünyesel rötreyi önemli ölçüde azalttığı hatta bir hacim artışına neden olduğu da belirtilmektedir. Beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir mineral katkı olan uçucu külün çimento ile yer değiştirmesi, genellikle bünyesel rötreyi düşürmekle birlikte kuruma rötresini arttırmaktadır. Tüm bunların yanında kullanılan katkının dozajının da önemli bir etken olduğu gözden kaçırılmamalıdır [3, 19, 32, 37, 58, 71 ve 90].

3.4.3. Kimyasal Katkılar (Chemical Additives)

Beton katkı maddeleri karışımı kendi içinde değişiklik yaptığından rötreyi etkileyebilir. Bu özellikle süper akışkanlaştırıcılar ve su indirgeyiciler için doğrudur. Bununla beraber, katkıların beton bileşiminde değişiklik yapmaları da rötreyi etkileyebilirler. Ancak beton katkı maddelerinin betonun rötresi üzerinde önemli bir etki yapmayacakları da ileri sürülebilir. Bu durum kalsiyum klorürlü hızlandırıcılar için gerekli değildir, bu tür katkıların mevcudiyeti rötreyi arttırır. Telis bezi veya diğer su tutucu örtüler genelde kullanılır. Yüzeyde hasar oluşumunu engellemek için beton sertleşir sertleşmez su tutucu örtüler serilmelidir. Özellikle döşeme köşelerinde daha dikkatli ve özenli olunmalıdır. Örtülerin sürekli nemli olmaları sağlanmalıdır [80].

Kimyasal katkıların kullanımı, gözenek suyunda yüzey gerilimi azaltmak yoluyla gerilme ve çatlakların azalmasını sağlar [30]. Süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımını, yüksek performanslı betonların kaçınılmaz bir bileşenidir. Bu katkıların S/Ç oranını düşürmenin dışında hidrasyon ürünlerinin morfolojisi üzerinde ve hidrasyon hızı üzerinde etkileri vardır [58].

Çimento incelik artışı betonda boşluk oranını azaltır. Diğer yandan incelik arttıkça su ihtiyacı da artacak, dolayısıyla



işlenebilirlik azalacaktır [63]. Günümüzde yaygın kullanılan yüksek oran su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanımıyla inceliğin artışının beraberinde getirdiği su ihtiyacı azaltılabilir. Böylece işlenebilirlik artıp, porozite azaltılabilir. Daha geçirimsiz bir betonun rötremiktarı da az olacağından çimentonun inceliğinin artışı, rötreyi de azaltmış olur [34].

Kimyasal katkı türlerinin etkilerini araştırırken bu katkıları kullanım amacına göre sınıflandırmak yararlı olacaktır. Zira bazı kimyasal katkıları betonun hacim stabilitesi üzerinde etki yapacak şekilde tasarlanırken bazılarının kullanım amacı tamamen farklıdır.

Süper akışkanlaştırıcı katkıları betona S/Ç oranını düşürmek amacıyla katılmasına karşın, bu katkıları kullanılması durumunda betonun bünyesel rötresinin karakteri bir miktar değişebilmektedir. Aslında SA katkıları bünyesel rötrem büyüklüğü üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Ancak SA katkıları bünyesel rötrenin gelişimini, yani karakterini etkileyebilir. SA katkıları kullanılması durumunda bünyesel rötrenin ivmelenme periyodunun başlangıcı gecikebilir. Bu da SA katkılarının C3S'in hidratasyonunu geciktirmesinden kaynaklanmaktadır. C3S'in hidratasyonu geciktiği için bünyesel rötrenin ivmelenme periyodunun başlangıcı da uzamaktadır [48 ve 73]. Akışkanlaştırıcı katkıları yanında çimento hamurunun hacim stabilitesiyle doğrudan ilgili kimyasal katkıları (rötrem önleyici ve genleştirici) bünyesel rötrem büyüklüğünü etkileyeceği muhakkaktır. Yapılan çalışmalarda genleştirici katkıları bünyesel rötrem büyüklüğünü azalttığı ancak bunun bağlayıcı tipine ve betonda kullanılan mineral katkıları türüne de bağlı olduğu belirtilmektedir [14 ve 58].

Atış ve Akçaözoğlu (2001), yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar, düşük S/B malzeme oranı ile birlikte çimentonun kısmen uçucu kül ile ikame edilmesinin beton rötrem değerlerinde %55'e kadar azalmaya sebep olmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen betonlar ise bu katkı malzemesi kullanılmadan üretilen betonların rötresinden daha yüksek rötrem değerleri göstermektedir. Uygun bir şekilde tasarlandığında uçucu kül içeren betonun, rötrem birim kısalmalarından sakınılması gereken geniş endüstriyel saha betonları ve özellikle beton yol döşemeleri yapımı gibi alanlarda kullanılmaya uygun olduğunu düşünmektedir [9].

3.4.4. Lif Kullanımı (Use of Fiber)

Yapılan deneysel çalışmalarda yüksek performanslı betonlarda çelik ve diğer türlerde lif kullanıldığı durumda bünyesel rötrem büyüklüklerinde düşüşler olduğu, kısıtlanmış bünyesel rötrem deneyinde ilk çatlama süresinin normal betonlara nazaran daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında lifli betonlarda bünyesel rötrem gelişimi lifsiz betona göre daha erken sonlanarak sabit bir değere yakınsamaktadır. Lifsiz betonda büzülme devam ederken lifli betonun boyutu belirli bir aşamadan sonra sabit kalmaktadır [40, 56 ve 58].

Esen'e göre (2003), lifli betonun kullanım amaçlarından biride, betonda oluşan ve betonun doğal özelliği olarak kabul edilen plastik rötrem çatlakları ile termik çatlakları önlemeye dayanmaktadır. Lifler, betonun ilk zamanlardaki plastik rötrem çatlaklarını %90 azaltmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı, betonun dayanıklılığını (durabilite) arttırmak, ana donatıyı korozyona karşı korumak, plastik rötrem ve termal çatlakları önlemek amacıyla kullanılmalıdır [25].

4. RÖTREYE KARŞI ALINACAK BAZI ÖNLEMLER (SOME MEASURES TO BE TAKEN AGAINST SHRINKAGE)

Bir betonun rötresini tam olarak önlemek mümkün değildir. Ancak rötrenin etkisi azaltılarak zararsız hale getirilebilir. Bu amaçla ya



rötre değeri azaltılır veya gelişme seyri değiştirilir. Örneğin, bazı önlemler alınarak ilk günlerde rötrenin büyük değerler almasına engel olunur. Böylece beton mukavemet almadan rötre nedeni ile betonun çatlaması önlenmiş olur.

Rötreye karşı pratikte alınan başlıca önlemler şunlardır:

- Çimento dozajı gereksiz olarak artırılmamalıdır (Çimento dozajının yüksek olması rötreyi büyük ölçüde artırır).
- Az rötre yapan bir çimento tipi kullanılmalıdır (İnceliği yüksek çimentolar rötreyi artırıcı etki yapar).
- Su/çimento oranı minimumda tutulmalıdır.
- Betonda iri agrega oranının maksimum olmasına çalışılmalıdır. Ayrıca kullanılan agrega tanelerinin elastiklik modülleri yüksek olmalıdır. Beton kalıba iyi bir şekilde yerleştirilerek ve sıkıştırılarak mümkün olduğunca az boşluk kalması sağlanmalıdır.
- Beton, döküldükten sonra ilk 2 hafta ıslak tutulmalıdır. Böylece betonun hızlı sertleşme yaptığı ilk günlerde buharlaşma önlenerek rötrenin büyük değerler almaması sağlanmış olur.
- Betonarme yapılarda donatılar önemli bir gerekçe olmadıkça artırılmamalıdır. Zira bir kesitte donatı miktarının artması betonun çekme gerilmesinin artmasına sebep olur. Diğer taraftan donatıların da kabil olduğu kadar simetrik yerleştirilmesi gerekir. Bu suretle rötre gerilmelerinin uniform bir şekilde yayılması sağlanır ve bu gerilmelerin bu suretle bazı noktalarda büyük bir değer almasının önüne geçilmiş olur.
- Prizi çabuklaştırmak için kullanılan katkı maddelerinin daima rötreyi arttırma eğilim vardır. Bundan dolayı bu maddeleri kullanmadan önce bunların rötreyi ne miktarda arttırdığı ve meydana gelecek rötrenin ne gibi zararlar yapabileceği incelenmelidir.
- Havanın rölatif rutubet derecesinin düşük ve S/Ç oranının büyük olması ve kullanılan çimentonun fazla rötre yapan cinsten olması rötre bakımından en elverişsiz durumdur.
- Rötrenin zararlı etkilerinden kurtulmak için bazı araştırmacılar rötresiz çimento yapmayı düşünmüşlerdir. Böyle bir çimento elde etmek için çimento içine genişleme özelliği olan uygun katkıları katılmaktadır. Rötreye eşit bir genişleme sağlanarak çimentonun sertleşme sırasında boyutlarında azalma meydana gelmesi önlenmektedir.
- Rötreye yapmayan bu tip çimentolar, Portlant çimentosuna bir miktar yüksek fırın çürüğü ve bir miktar genişleyen madde ilave etmek suretiyle üretilebilmektedir. Genişleyen madde %50 jips, %50 boksit ve %25 oranında da CaCO₃ karışımının pişirilmesi ve sonra da öğütülmesi ile elde edilmektedir. Yapılan birçok deney böyle bir bağlayıcı maddenin rötre yapmadığını göstermiştir. Rötresiz çimentolar daha çok Birleşik Amerika'da oldukça geniş bir uygulama alanı görmektedir. Bu çimentonun kullanılması ile rötrenin zararlı etkilerinden tamamen kurtulunmuş olmaktadır.

Rötre çatlağı betonda iki tür erken yaş çatlağı göz önüne alınmaktadır. Birincisi, betonun akışkan olarak düşünüldüğü evrede, takriben prizden önce hâsıl olan plastik rötre çatlağıdır [13]. İkinci tür ise beton akışkandan visko-elastik katıya dönüştükten sonra görülen rötre çatlaklarıdır.

Birincisi, plastik rötre çatlakları beton yüzeyinden başlayarak iç kısımlara doğru uzanan derin çatlaklar değildirler. O nedenle, genellikle, betonun dayanımını azaltabilecek kadar etkileri yoktur. Sadece beton yüzeyinin görünümünü bozmaktadırlar. Buna karşın, zaman içerisinde beton yüzeyine dışarıdan gelebilecek bazı yıpratıcı etkiler



karşısında bu çatlaklar daha derin çatlaklar haline dönüşebilmekte ve beton dayanıklılığının azalmasına yol açabilmektedirler [23].

İkincisi ise bu durum beton rötresinin iç ve dış etkenler tarafından kısıtlanması neticesinde meydana gelmektedir. Bir beton elemanın serbestçe rötreye göstermesini engelleyen faktörlerden birkaçı aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- Bir beton eleman içindeki farklı rötreyeler
- Beton elemanlar arasındaki farklı rötreyeler
- Agregalara bağlı kısıtlama
- Betonarme elemandaki çeliğin kısıtlanması
- Temel veya bir döşemeye bağlı kısıtlamalar.

Bu kısıtlamalar sonucunda doğan çekme gerilmelerinin çatlak oluşumuna yol açıp açmayacağı betonun çekme mukavemetine, kısıtlama olmadan gösterdiği (serbest) rötreye, sünmeye ve mevcut olan kısıtların derecesine bağlı olmaktadır. Oluşan çatlakların genişliği ise yukarıda sayılan faktörlerin yanı sıra elastisite modülü ve kırılma tokluğuna bağlı olarak değişmektedir [66 ve 67].

Beton sıcaklığının 15-20°C arasında olması idealdir. Fakat bu durum her zaman sağlanamamaktadır. Beton sıcaklığı TS EN 206-1 standardına göre en düşük 5°C olmalıdır. Beton sıcaklığının bu standartta üst limiti olmasa da 32°C'nin (ASTM C 94) üstünde olmaması idealdir. Genel olarak bir saatte beton yüzeyinin 1 m²'lik alanından buharlaşan su miktarı 1 kg'dan fazla ise gerekli önlemler alınmalıdır [80].

Erken yaştaki gerilme gelişimi üzerine yapılan çalışmalar, bu süreçte meydana gelen visko-elastik davranışın önemini açıkça ortaya koymaktadır. Zira bu çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre visko-elastik davranış neticesinde ortaya çıkan gevşeme miktarı, rötreye kaynaklı (gevşeme olmadan ortaya çıkan) gerilmenin %50'sinden daha fazla olabilmektedir.

Yapılan araştırmalarda dikkat çeken bir diğer konu da beton bileşimi ile bağlayıcı maddenin rötreye ve gevşeme üzerindeki etkisidir. Örneğin; silis dumanı diğer mineral katkılara göre daha fazla otojen rötreye sebebiyet verirken, silis dumanının dahil olduğu bir sistemdeki (bünyesel rötreye esaslı) gerilme gelişimi beklenenden az olmaktadır. Bu eğilim; silis dumanlı betonun, eşit S/B oranına sahip ve bağlayıcı olarak sadece portland çimentosu içeren betona göre erken yaşta daha fazla sünme göstermesinin, bir başka deyişle daha ileri visko-elastik davranış sergilemesinin bir sonucu olarak gerçekleşmektedir [12].

Betonda yüzey/hacim oranı yüksek olan ince malzemeler fazla ise, betonda plastik rötreye riski vardır. Belirli bir S/Ç oranı için, ince malzeme ve çimento dozajı arttıkça, plastik rötrenin arttığı deneylerle kanıtlanmıştır. Betonda yeterli kadar ince malzeme var ve beton az boşluklu ise beton terleme suyunun yukarı çıkması güçleşir. Yüzeyden buharlaşan suyun yerine terleme suyu gelemedince beton yüzeyi kurur ve çatlaklar oluşur. Böyle bir durumda başka etkileri göz önüne alarak, ince malzeme ve gereğinden fazla çimento kullanılmasına sınırlama getirilebilir. Oturma çatlaklarının oluşumunda ise aşırı su kullanımının işlevi büyüktür. Böyle bir durumda da su tutucu maddelerin miktarını arttırmak gerekir. Diğer bir deyişle dozaj ve ince agrega arttırılabilir, puzolanlar da yarar sağlayabilir, böylece kohezyon artar. Hava sürükleyici katkının kullanılması terlemeyi azaltır, dolayısıyla oturma çatlakları önlenir [93].

Gölgede 32°C'yi aşan sıcaklıklarda betonun döküm ve bakımında aşağıdaki önlemleri almak gerekir:

- Betonun döküleceği zemin, donatı ve kalıpta göllenmeye meydan vermeyecek şekilde ıslatılır, ıslatma suyu buharlaşır



buharlaşmaz döküm yapılır. Böylece sıcak bir havada hem donatıların hem de kalıbın sıcaklığı düşürülür, ayrıca zemin ve asmolen gibi su emici yüzeylerin de beton suyunu emmesi önlenir. Aşırı sıcak havalarda beton dökümünün geceleri yapılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, malzemelerin (su, agrega) soğutulması, hidrasyon ısısı düşük çimento kullanılması ve geciktirici katkı kullanılması tercih edilebilir.

- Taze beton çatlaklarına karşı alınacak en önemli önlemlerden biri, betonun dökümü sırasında iyi işlenmesi ve daha sonra gerekli bakımın yapılmasıdır. Beton aşırı akışkan olmamalı ve vibrasyonu gerektirecek bir kıvamda olmalıdır. Beton kalıbına vibratörle yerleştirildikten sonra hemen ilk mastarlama yapılır. Daha sonra bir insan beton üzerine çıktığında yaklaşık 2 mm derinlikte iz oluşunca ikinci mastarlama işlemi yapılır. Mastarlama işleminin yavaş ve düzgün yapılmasına özen gösterilmelidir.
- Rüzgara karşı korumak için rüzgar kırıcı engeller oluşturulur. Beton yüzeyini doğrudan güneş ışınlarından korumak için beyaz renkli yansıtıcı plastik örtüler ile kaplamak gerekir. Beton yüzeyine "curing compound" adı verilen maddeler de sürülebilir. Bu işlem yüzeydeki parlaklık sona erinceye kadar beklendikten sonra yapılmalıdır.
- Diğer bir yöntem ise, spreyle su püskürterek veya suya doymuş talaş, ıslak kum gibi maddeler ile kaplayarak yüzeyin nemli tutulmasını sağlamaktır.
- Taze betonun kür süresi de değişik etkenlere bağlıdır. Ancak normal betonarme yapılarında bu süre yaz aylarında en az bir hafta olmalıdır. Bu süre içinde ise günde en az üç kez sulama yapılmalıdır. Sulama için kullanılacak su, şehir suyu değilse içinde betonarme elemanları için zararlı olacak sülfat, asit, tuz gibi kimyasal maddeler bulunmamalıdır [93].

5. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yukarıdaki bölümlerde yapılan açıklamalardan anlaşılacağı üzere, rötire olayı çimento içinde bulunan kılcallık ve jel suyunun miktarlarının değişmesi sonunda meydana gelmektedir. Çimento hamuru içinde bulunan bu iki çeşit suyun miktarları, buharlaşma yoluyla ve çimentonun hidrasyonu ile zamanla önemli ölçüde değişmektedir. Böyle olunca, buharlaşma tamamen önlenmiş olsa dahi, havada tutulmuş olan katılaştırmış betonun rötire yapmasını tam olarak önlemek mümkün olmaz. Ancak serbest suyun buharlaşma yoluyla uzaklaşması halinde rötire önemli derecede artış gösterir.

Taze beton yüzeyindeki buharlaşma hızının fazla oluşu nedeniyle kaybedilen su, betonun terlemesi ile karşılanamadığı durumlarda plastik rötire çatlakları oluşur. Yüzeye yakın kısımlarda beton, su kaybederek büzülür. Altındaki beton ise bu büzülmeye uymadığı için üstteki beton tabakasında çekme gerilmeleri oluşur ve betonun çatlamasına yol açar. Bu çatlamaların nedenlerini aşağıdaki başlıklar altında toplayabiliriz. Ayrıca;

- Betonun boşluksuz, sıkı olarak üretilmesi
- Beton içindeki suyun terlemeyle yukarı çıkamaması
- Beton karışımındaki ince tanelerin fazla olması
- Özellikle dökme çimentolarda çimento sıcaklığının fazla olması
- Betonda inceliği fazla olan çimentoların kullanılması
- Betonun döküldüğü zemin veya kalıbın su emmesi ya da su veya serbet kaçırmaması



• Yerleştirilen betonun olduğu gibi bırakılması yüzey ıslahı veya kürlleme yapılmaması

• Hatalı donatı kullanılması gibi hususlar rötreye neden olmaktadır.

Yüksek buharlaşma hızına dolayısıyla plastik rötreye neden olabilecek koşullar ise şunlardır;

- 5 mph dan daha yüksek rüzgar hızı
 - Düşük bağıl nem
 - Yüksek ortam ya da beton sıcaklığı
 - Bünye suyunun az olması da düşük buharlaşma oranlarında bile plastik rötreye oluşumuna sebebiyet verir.
- Betonda terleme hızını düşüren faktörlerde şunlardır;
- Çimento içeriği
 - Yüksek parçacık oranı
 - Yüksek beton sıcaklığı
 - İnce parçacık miktarı fazlalığı
 - İnce tabakalaşma ve
 - Sürüklenmiş hava miktarıdır.
- Priz başlangıcını erteleyebilecek bütün koşullar plastik rötreye oluşumuna sebebiyet verebilir. Bunlar;
- Soğuk hava
 - Soğuk zemin
 - Yüksek su miktarı
 - Düşük çimento miktarı
 - Priz geciktirici katkıları ve
 - Su kesici katkıları olabilir.

Sıcak havada dökülecek betonların sıcaklığının çok yüksek olmaması gerekmektedir. Gerekirse, beton sıcaklığının düşük tutulması için karışım suyu ve/veya agrega soğutularak kullanılmalıdır. İstenilen kalitedeki beton karışımı, mümkün olabildiği kadar az miktarda su ile elde edilmelidir. Gerekirse, su azaltıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır. Rüzgar hızı yüksek olduğu takdirde, rüzgar hızını azaltacak bariyerler kullanılmalıdır. Sıcak havada, betonun yerleştirilmesinden önce, kalıplar ve zemin nemli bir duruma getirilmelidir. Beton kalıbına vibratörle yerleştirildikten sonra hemen önce mastarlama yapılır. Daha sonra bir insan beton üzerine çıktığında yaklaşık 2mm derinlikte iz oluşunca ikinci mastarlama işlemi yapılır. Mastarlama işleminin yavaş ve düzgün yapılmasına özen gösterilmelidir.

İnceliğin artmasıyla daha fazla çimento tanesi aynı zamanda hidratasyona katılarak önemli miktarda rötreye meydana getirirler. İncelik ile artan su miktarı da rötrenin artmasında rol oynar. İnceliğin artmasıyla hidratasyon hızlandığından kılcallık suyunun büyük bir kısmı tutulmuş olur. Böylece suyun büyük bir kısmı tutulduğundan buharla undan buharlaşma az miktarda gerçekleşir.

Çimentoda birleşmemiş CaO, MgO ve SO₃ gibi hacim genişemesi yapan maddelerin standartlarda belirtilen miktarların biraz daha biraz daha üzerinde bulunması rötreyi önemli derecede azaltabilir. Bu hacim genişemesi yapan maddelerin miktarlarını uygun seçmek suretiyle rötresiz (genleşen) çimento yapılabilir.

Çimento üretiminde priz süresini dengelemek amacıyla kullanılan alçı taşının da, rötreye üzerine etkisi bulunmaktadır. Az miktarda alçı taşı kullanılması çimentonun hidrate elemanlarının iç yapısını etkileyerek rötrenin artmasına neden olmaktadır. Eğer çimentonun daha az rötreye yapması isteniyorsa, normalden biraz daha fazla alçı taşı kullanılmalıdır.



Özellikle serbest rötire betonda çatlak oluşma potansiyelini etkileyen faktörlerden biridir. Buna ek olarak donatının varlığı, numune boyutu ve kısıtlama da bu faktörlerden sayılmaktadırlar. Rötire çatlaklarını belirlemek için rötirenin bütün evrelerinin ve mekanizmalarının incelenmesi gerekmektedir [28].

Plastik rötire çatlakları, adından belli olduğu gibi beton plastik haldeyken görülen çatlaklardır. Beton yüzeyinin çok hızlı kuruması sonucu betonda hacimsel bir daralma (büzülme) oluşur. Plastik rötire çatlakları rastgele bir dizilişte olacağı gibi birbirine paralel şekilde de görülebilir. Genelde 25mm ile 2m arasında uzunlukta oluşurlar ve en çok 3 mm genişliktedirler. Plastik rötire çatlakları estetik açıdan hoş bir görüntüye neden olmaz. Ayrıca dayanıma direk bir etkisi olmasa da zamanla çatlaklardan beton içine sızacak zararlı maddeler betonun dayanımını olumsuz etkiler [80].

Kuruma rötresi su kaybına sebep olmaktadır. Büzülme beton içindeki nemin çevreyle dengeye geldiğinde durur. Dolayısıyla su kaybı sınırlı olacağından kuruma rötresi de sınırlı olacaktır. Kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan otojen veya karbonlaşma da dediğimiz kimyasal rötire dışında kalan tamamen fiziksel bir olay olan kuruma rötresi ağırlık kaybının gözlemlenmesiyle açıklanabilecek bir olaydır [11]. Kuruma rötresi terimi, genellikle sertleşmiş beton özeliği olarak kullanılan bir terimdir. Sertleşmiş betonda meydana gelen su kaybı nedeniyle oluşan şekil değiştirmeyi ifade eder.

Bünyesel rötire, beton hidrasyonu sırasında kendi kendine kururken oluşan kuruma rötresinin özel bir halidir.

Karbonatlaşma rötresi de, kuruma rötresinin hidrate olmuş çimentonun karbondioksitle reaksiyona girdiğinde oluşan bir başka türüdür. Kuruyan betonun hacmindeki değişim kaybedilen suyun hacmine eşit değildir. Kuruma devam ederken, emilmiş su yapıdan kaybolur ve bu durumda çimento pastasındaki hacim değişimi, jel parçacıklarının bütün yüzeylerinden 1 molekül kalınlıkta olan su kaybına eşittir. Bu nedenle, jel yapısının kimyasal ve mineralojik özelliklerinden çok fiziksel yapısının önemli olduğu söylenebilir. Rötire kısıtlandığında betonda oluşan iç gerilmelere bağlı olarak çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Beton tasarımı rötirenin dikkate alınmaması, elemanlarda rötire sırasında oluşan bazı çatlaklara ve görünüm bozukluklarına neden olmaktadır. Bu çatlaklardan yabancı maddelerin girişi ve bunun sonucu olarak beton dayanımı ve dayanıklılığında düşüşler oluşmaktadır [16].

Beton prizini almamışken (plastik haldeyken) buharlaşmanın engellenmesi en etkin önlemdir. Bu konuda alınabilecek önlemler şunlardır;

- Beton eleman rüzgara maruz bırakılmamalı
- Ortam sıcaklığı mümkün olduğunca düşük tutulmalı
- Serbest su miktarı azaltılmalı
- Betonda Lif Kullanılmalıdır [81].

Betonda boşluk sistemi kullanılan S/Ç oranı ve hidrasyon hızı ile yakından ilgilidir. Çatlaklar ise özellikle betonun erken yaşta dayanımı düşük ve hacimsel şekil değiştirmelerin en fazla olduğu erken yaşlarda gerçekleşir. Erken yaşlarda oluşan çatlama riski, gerilme analizi yapılarak hesaplanabilir. Bu süreç içerisinde, ısıl şekil değiştirmeler ve bünyesel rötire, betonu çatlatmaya çalışan gerilmelerdir. Zaman içinde giderek artan bu gerilmeler, betonun gelişmekte olan erken yaş çekme dayanımını aştığı noktada betonun çatlama ile sonuçlanır. Alınacak tüm önlemlere rağmen, betonun çatlama riskinin kaçınılmaz olduğu durumda, çatlak genişliklerinin beton geçirimsizliği ve yapı dayanıklılığı açısından önem taşıdığı hatırlanmalıdır. Çatlak riski kontrolü, oluşan çatlakların yerinin ve



zaman içinde genişliklerinin takibini de içermektedir. Çatlak genişliklerinin zaman içinde, betonun kendiliğinden kapanması mümkün değerlerin üzerine çıkması halinde, çatlakların enjeksiyon veya tamir malzemeleri ile onarılması gerekmektedir. Bu durumda, yapının hizmet ömrüne uygun tamir malzemeleri ve yöntemler uygulanmalıdır. Bu yüzden, erken yaş çatlaklarının tamirinde kullanılacak malzeme ve yöntemlerin de ön testleri, yapı üretimine başlamadan önce yapılarak uygunluğu kontrol altına alınmalıdır [2].

Ultra yüksek dayanımlı betonlarda S/Ç oranının çok düşük olması ve silis dumanının da etkisi ile bünyesel rötire artmaktadır [96]. Bu betonlara yüksek sıcaklıklar uygulanması ile çimento hidrasyonun hızlanmasına bağlı olarak termal ve bünyesel rötire etkisinde betonda mikro çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar zamanla gelişerek büyümektedir [31].

Kısıtlanmış rötire çatlakları ise betonarme perdenin oturduğu yerde bulunan düşey donatıların ve bazı yerlerde de uç kısmında kolon bulunan perdelerin serbestçe rötire (büzülme, kısalma) yapması engellendiğinde oluşur. Bu rötire zamanla kuruma rötresi olarak devam eder ve 3 ay gibi bir zaman sonra büyük bir çoğunlukla genelde son bulur. Bu olay çimento dozajının yüksek olduğu (dolayısıyla beton sınıfının ve hidrasyon ısısının yüksek olduğu) yerlerde daha fazla olur. Beton kütle betonu davranışında olur [92].

Prizi hızlandırmak için kullanılan katkı maddeleri genellikle rötreyi artırır. Bu yüzden beton katkı maddelerini kullanmadan önce bunların rötreyi hangi oranda artırdığı ve meydana gelecek rötrenin ne gibi zararlar verebileceği incelenmelidir. Rötreyi azaltmak için özellikle erken yaşlarda %90'nin üzerinde neme ihtiyaç vardır. Rötire miktarının azalması için S/Ç oranının mümkün olduğunca düşük seçilmesi gerekmektedir. GRC gibi koyu kıvamlı bir betonda uygun akışkanlaştırıcı kullanımı ile çok düşük su/çimento oranları elde edilebilir. Kimyasal rötire ise betonda derin ve tek doğrultuda ilerleyen çatlaklardır şeklinde kendini gösterir [81].

Sonuç olarak, beton rötresi doğrudan çimentodan kaynaklanan bir olaydır. Arıca buharlaşmayı kolaylaştıran her sebep rötreyi artırır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Çimento hidrasyonunun yıllarca devam etmesi betonun zamana bağlı deformasyon göstermesine neden olmaktadır. Zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzeme olarak beton için rötire ve sünme deformasyonları dikkate alınması gerekir. Rötire olayı (Resim 1-5), hem beton tazeyken, hem de sertleşmiş durumdayken oluşabilen bir olaydır. Taze betondaki su kaybı tamamen fiziksel nedenlere dayanmaktadır. Taze beton içerisindeki suyun bir miktarı, betonun yerleştirilmiş olduğu kalıplar veya zemin tarafından emilerek kaybolabilmektedir. Ancak asıl su kaybı betonun buharlaşması ile gerçekleşmektedir. Taze betondaki terleme nedeni ile beton yüzeyine yakın veya yüzeye yakın kısımlara çıkan suyun hızla buharlaşması sonucunda, beton yüzeyi kuruyarak büzülme göstermektedir. Sertleşmiş betondaki su kaybı, hem fiziksel hem de kimyasal nedenlerle gerçekleşebilmektedir. Betonun kuruması, karbonatlaşması ve betonun yapısındaki çimentonun hidrasyonu, sertleşmiş betonda bulunan suyun azalmasına yol açan başlıca etkenlerdir. Betonda buharlaşmayı kolaylaştıran bütün olaylar veya nedenler rötreyi artırmaktadır.

Hidrolik rötire, betonun boşluklarındaki suyun kaybıyla; termik rötire, kütle betonlarında iç-dış sıcaklık farkı nedeniyle meydana gelen farklı termal genişleme sonucu; bünyesel rötire, çimento hidrasyon ürünlerinin daha az hacim kaplamasından dolayı; plastik rötire, betonda terlemenin buharlaşmayı karşılayamaması ve



karbonatlaşma rötresi ise sertleşmiş betonda karbonatlaşma reaksiyonu ile ortaya çıkan suyun buharlaşması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Plastik rötire, oturma çatlakları ve kısıtlanmış rötire çatlaklarının onarımı betonun durabilitesi açısından yararlıdır. Bu çatlaklar, genişliklerine bağlı olarak uygulamada mevcut onarım harçları veya su kıvamındaki epoksi kullanılarak ve elle uygulama yapılarak doldurulup betonun uzun süreli performansı arttırılabilir. Böylece olası donatı korozyonu önlenmiş olur.

Yerine yerleştirilen betona uygulanması düşünülen kür yöntemi hemen başlatılmalıdır. Kür işlemi en az 7 gün süreyle uygulanmalıdır. Örneğin kısıtlanmış rötire çatlakları aşağıdaki önlemler alınarak azaltılabilir.

- Betonda S/Ç oranı düşük tutulmalı
- Kalıp alma süresi uzatılmalı, doğru ve standart kür uygulaması yapılmalı
- Perdelerdeki düşey ve özellikle yatay donatıların yeterli olup olmadığı kontrol edilmeli
- Üretim sırasında sadece perde gibi betonarme elemanlar için beton içine kısa kesilmiş polietilen lif veya çelik tel katılmalıdır.

Betonda tüm rötire çeşitlerini engellemek için yapılması gerekenler şunlardır;

- Betonda gereğinden fazla çimentonun kullanılmaması
- Çok ince çimentoların kullanılmaması
- Kür uygulamasına özen gösterilmesi
- Düşük su/çimento oranı ile çalışılması
- Agregata tane boyutunu arttırılması
- Rötresi az olan çimentoların kullanılması
- Mineral katkıların kullanılması
- Gereğinden fazla su kullanılmaması
- Beton döküldükten sonra 1 veya 2 hafta süreyle sürekli nemli tutulması
- Betonarme yapılarda gereğinden fazla donatı bulundurulmaması (donatı miktarı artarsa, rötreden dolayı betondaki çekme gerilmeleri artar) ve donatı mümkün olduğu kadar simetrik yerleştirilmesi şeklinde özetlenebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aka, İ., Keskinel, F. ve Arda, T.S., (1996). Yapı malzemesi olarak betonarme (IX.Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- [2] Akkaya, Y., (2013). Sertleşmekte olan beton özelliklerinin çatlak riski açısından değerlendirilmesi. Hazır Beton Kongresi, İstanbul.



- [3] Akkaya, Y., Konsta-Gdoutos, M., and Shah, S.P., (2004). The pore structure and autogenous shrinkage of high-performance concrete with ternary binders, Proc. of Eight Canmet ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, USA, 233-249.
- [4] Akman, M.S., (2007). Yüksek performanslı betonlarda otojen rötre. SİKA Teknik Bülten / Makaleler, İstanbul.
- [5] Aköz, F., Yüzer, N., Biricik, H. ve Koral, S., (1997). Silis dumanı katkılı beton özelliklerine kür koşullarının etkileri. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, 63-71. Eskişehir-Türkiye.
- [6] Akperov, A. ve Akyüz, S., (2006). Betonun zamana bağlı deformasyonlarının tahmini. İTÜ Dergisi/d, 5(3):155-164.
- [7] Alonso C., Andrade C., Khoury, G.A., (2003). Porosity and microcracking. International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [8] Arıoğlu, E., Arıoğlu, N. ve Yılmaz, A.O., (2006). Beton agregaları -çözümlü problemler (Bilgi Föyleri). İstanbul: Evrim Yayınevi.
- [9] Atış, C.D. ve Akçaözoğlu, K., (2001). Yüksek oranda uçucu kül içeren betonun rötresi. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi - A: Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik, 2(1):117-123.
- [10] Atış, C.D., (2000). Heat evolution and drying shrinkage of concrete containing high volume fly ash. Proceedings of Second International Symposium in Cement and Concrete Technology in the 2000's, İstanbul, 359-369.
- [11] Bazant, Z.P., (2000). Criteria for rational prediction of creep and shrinkage of concrete. Concrete Institute, 237-260.
- [12] Bentur, A., (2002). Overview of early age cracking, early age cracking in cementitious systems, Report of RILEM Technical Committee, France.
- [13] Bentur, A., Igarashi, S.I. and Kovler, K., (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. Cement and Concrete Research, (31):1587-1591.
- [14] Bentz, D.P. ve O.M.Jensen, O.M., (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Composites, 26(6):677-685.
- [15] Bentz, D.P., Geiker, M.R. and Hansen, K.K., (2001). Shrinkage reducing admixtures and early age dessication in cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, (31):1075-1085.
- [16] Bilir, T. ve Topçu, İ.B., (2015). Yan ürün ince agregalarının kuruma rötresi çatlaklarına etkisi. Türkiye Alim Kitapları. ISBN-13:978-639-67208-4
- [17] Bissonnette, B., (1996). Le fluage en traction, un Aspect Important de la Problematique des Reparations Minces en Beton (PhD). Laval University.
- [18] Bombled, J.P., (1980). Influence of sulfates on the rheological behavior of cement paste and their evolution, Proc. 7th Intern. Cong. Chemistry of Cement, Paris, 164-169.
- [19] Brooks, J.J., Cabrera, J.G., and Megat Johari, M.A., (1998). Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high strength concrete, proceedings of the international workshop on autogenous shrinkage of concrete, Hiroshima, Japan, June 13-14, 195-202.
- [20] Ekinci, C.E., (2016). Yapı. Ankara: Data Yayınları
- [21] Ekinci, C.E., (2020). Bordo kitap: mimar ve mühendisin inşaat el kitabı (6.Baskı). Ankara: Daya Yayınları



- [22] Erdoğan, T.Y. ve Erdem, T.K., (2002). Buhar kürü uygulamasında beton özelliklerini etkileyen faktörlerden bekleme süresinin önemi. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [23] Erdoğan, T.Y., (2003). Beton. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim.
- [24] Ersoy, U., Özcebe, G., (2004). Betonarme (II.Baskı). İstanbul: Evrim Yayınevi.
- [25] Esen, Y., (2003). Poliakrilonitril lifi takviyeli betonlarda süneklilik ve rötre özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları. 1(2):108-112.
- [26] Geçten, O. ve Gül, R., (2019). Hafif ve normal agregalı betonlarda atmosferik kürün su emme, rötre ve ısı iletkenliği üzerine etkileri. TÜBAV Bilim Dergisi, 12(3):20-31.
- [27] Gerwick, B.C., (1993). Construction of prestressed concrete structures, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, pp. 19-23,
- [28] Holt, E. ve Levio, M., (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. Cement and Concrete Composites, 26(5):521-530.
- [29] Holt, E., (2005). Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. Cement and Concrete Research. (35):464-472.
- [30] Işıldar, N., (2018). Köpük betonda kuruma büzülmesi (Yüksek Lisans Tezi). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Jennifer, J.S. and Harald, S.M., (2012). Microstructure of ultra high performance concrete and its impact of durability. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel; March 7-9.
- [32] Jensen, O.M. and Hansen., P.F., (1999). Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste. Cement and Concrete Research, (29):567-575.
- [33] Jianhui, L., Cijun, S., Xianwei, M., Kamal, H.K., Jian, Z. ve Dehui, W., (2017). An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. Construction and Building Materials, (146):702-712.
- [34] Kadioğlu, T., (2006). Rötre azaltıcı katkı maddeleri (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [35] Karakulak, E., (2019). Uçucu kül ve kablo atıklarının çimento harcı üretiminde kullanılması (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [36] Khayat, K.H. ve Aitcin, P.C., (1992). Silica fume in concrete: an overview. fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proceedings Fourth International Conference, 835-872. İstanbul-Türkiye.
- [37] Koenders, E.A.B., Van Breugel, K., de Vries, J., and Soen, H., (1998). Mix optimization for concrete bridge in view of reduction of risk of cracking at early ages. Proceedings of the 13th FIP Congress, Amsterdam, May 1998.
- [38] Liu, B., Xie, Y., ve Li, J. (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. Cement and Concrete Research, (35):994-998.
- [39] Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A., and Touzo, L., (2000). A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an



- early age considering temperature history. *Cement and Concrete Research*, (30):915-922.
- [40] Loukili, A., Khelidj, A., and Richard, P., (1999). Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, (29):577-584.
- [41] Lura, P., Breugel, K. and Maruyama, I., (2001). Effects of curing temperature and type of cement on early age shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, (31):1867-1872.
- [42] Lynam, G.C., (1934). Growth and movement of portland cement concrete. Oxford University Press, London, U.K., pp.1-139.
- [43] Mazloom, M., Ramezani-pour, A.A., Brooks, J.J., (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, (26):347-357.
- [44] Mehta, P.K. and Monteiro, J.M.P., (2006). *Concrete, microstructure-properties and materials (3rd Edition.)*, Mc Graw Hill, 2006.
- [45] Mindess, S. and Young, J.F., (1981). *Concrete*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [46] Mukesh, L., Sevkett, C.B. ve Hsein, K., (2014). Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete. *Construction and Building Materials*, (71):397-405.
- [47] Narayanan, N. ve Ramamurthy, K., (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22: 321-329.
- [48] Nawa, T. and Horita T., (2004). Autogenous shrinkage of high-performance concrete, Proc. of the Int. Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures, Sapporo, Japan, February 10.
- [49] Neville, A.M. ve Brooks, J.J., (1993). *Concrete technology*. Longman Scientific and Technical, USA, 438.
- [50] Neville, A.M., (1995). *Properties of concrete (4th Edition)*. Longman, London.
- [51] Neville, A.M., (2000). *Properties of concrete*. Prentice Hall, England.
- [52] Neville, A.M., (2000). *Propriétés des bétons*. Paris, Éditions Eyrolles, pp. 804.
- [53] Niël, E.M.M.G., (1968). The influence of alkali carbonate on the hydration of cement. 5th International Symposium on Chemistry of Cement, Tokyo, 472-491.
- [54] Ono, M., Nagashima, M. and Saito, M., (1980). The stiffening of mortar accompanied with the early hydration of cement, Proc. 7th Intern.Cong. Chemistry of Cement, V2, Paris, 172-175.
- [55] Özcan, F. ve Atiş, C.D., (2017). Silis dumanı ile üretilen harçların karbonatlaşma ve rötire özellikleri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2):634-641. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341824>.
- [56] Paillère, A.M., Buil, M. and Serrano, J.J., (1989). Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete. *ACI Materials Journal*, 86(2):139-144.
- [57] Pehlivan, M., (2008). Betonun rötiresi üzerine bir çalışma (Yüksek lisans tezi). Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [58] Pekmezci, B.Y., (2006). Yüksek performanslı çimentolu ürünlerin otojen rötire özellikleri (Doktora tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.



- [59] Pekmezci, B.Y., Uyan, M. ve Akman, M.S., (2007). Yüksek performanslı çimentolu ürünlerin hamur fazının otojen rötre özellikleri. İTÜ Dergisi/d, 6(4):49-60.
- [60] Person, B., (1998). Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, (28):1023-1036.
- [61] Postacıoğlu, B., (1986). Beton (Cilt: 1). İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi.
- [62] Powers, T.C., (1962). The physical structure in portland cement paste, the chemistry of cements, T.C.Powers (Ed.), Academic Press, London and New York, 1, 391-416.
- [63] Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C., and Mann, H.M., (1954). Permeability of portland cement paste. ACI Journal Proceedings, 51(3):285-98.
- [64] Ramachandran V.S. and Beaudin J.J., (2000). Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, principles techniques, and applications. Noyes Publications, NJ, USA.
- [65] Rao, G.A., (2001). Long-term drying shrinkage of mortar- influence of silica fume and size of fine aggregate. Cement and Concrete Research, (31):171-175.
- [66] Shah, S.P., Karaguler, M.E. and Sarigaphuti, M., (1992). Effects of shrinkage reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete. ACI Materials Journal, 89, 289-295.
- [67] Shah, S.P., Ouyang, C., Marikunte, S., Yang, W. and Becq-Giraudon, E., (1998). A method to predict shrinkage cracking of concrete. ACI Materials Journal, (95):339-346.
- [68] Spierings, G.A.C.M. and Stein, H.N., (1976). The influence of Na₂O on the hydration of C3A; i. paste hydration. Cement and Concrete Research, (6):265-272.
- [69] Şimşek, O., (2004). Beton ve beton teknolojisi. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- [70] Taşdemir, M.A., (2002). Betonun durabiliteye göre tasarımı ve üretimi. İMO İstanbul Şubesi, Sürekli Eğitim Seminerleri, İstanbul.
- [71] Tazawa E. and Miyazawa S., (1995a). Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete. Cement and Concrete Research, (25):1633-1638.
- [72] Tazawa E., Miyazawa S. and Kasai T., (1995b). Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. Cement and Concrete Research, (25):288-292.
- [73] Tazawa, E. and Miyazawa, S., (1995c). Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research, (25):281-287.
- [74] Tuna, M.E., (2000). Betonarme inşaat, depreme dayanıklı yapı tasarımı (I.Baskı). İstanbul: Tuna Eğitim ve Kültür Vakfı.
- [75] Ulukaya, S., (2008). Kendiliğinden yerleşen betonlarda rötre ve rötre çatlaklarının incelenmesi (Yüksek lisans tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [76] URL-1. <https://insapedia.com/beton-kuru-nedir-kurleme-nasil-yapilir3507/> (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [77] URL-2. http://kisi.deu.edu.tr//halit.yazici/YM2/YM-II%239_BETONUN_BAKIMI.pdf. (Erişim Tarihi: 10.08.2020)
- [78] URL-3. http://www.thbb.org/media/165413/thbb_betonunyerlestirilmesivebakimi.pdf. (Erişim Tarihi: 11.08.2020)
- [79] URL-4. <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/agrega/> (Erişim Tarihi: 28.07.2019)



- [80] URL-5. Sıcak Havada Beton Üretimi ve Uygulamada Dikkat Edilecek Hususlar. http://www.akcansa.com.tr/docs/20111205105839_sicak-hava.pdf. (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [81] URL-6. <https://theconstructor.org/concrete/types-of-shrinkages-in-concrete-prevention/20384/> (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [82] URL-7. http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/fcc6593785a3828_ek.pdf. (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [83] URL-8. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=22>. (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [84] URL-9. <https://www.structuralguide.com/thermal-cracking-of-concrete/>
- [85] URL-10. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=798>. (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [86] URL-11. URL-11. https://www.researchgate.net/figure/Plastic-shrinkage-cracking-in-concrete_fig2_333880951. (Erişim Tarihi: 28.07.2020)
- [87] Verbeck, G.J., (1968). Field and laboratory studies of the sulfate resistance of concrete. In Performance of Concrete Resistance of Concrete to Sulfate and other Environmental Conditions: Thorvaldson Symposium. 113-24. Toronto-Canada.
- [88] Wiegrink, K., Marikunte, S.M., and Shah, S.P., (1996). Shrinkage cracking of highstrength concrete. *ACI Materials Journal*, 93(5):409-415.
- [89] Woermann, Th. and Hahn, Eysel W., (1979). The substitution of alkalis in tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*, 9(6):701-711.
- [90] Yang, Q. and Zhang, S., (2004). Self desiccation mechanism of high performance concrete. *Journal of Zhejiang University Science*, 5(12):1517-1523.
- [91] Yatağan, M.S. ve Karagüler, M.E., (2011). Çimento esaslı malzemelerde kısıtlanmış rötre ve durabilite ilişkisinin incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemler. Hazır Beton Kongresi, İstanbul.
- [92] Yıldırım, H., (2017). Betonarme yapılarda karşılaşılan çatlaklar, oluşma nedenleri ve onarılması. <http://imoistanbul.org/imoarsiv/seminer-notlari-nisan-2017/hasan-yildirim/notlar.pdf>
- [93] Yiğit, E., (2016). Betonda rötre ve sünme etkisi. <https://prezi.com/hjwzre8wx0x9/betonda-rotre-ve-sunme-etkisi/?frame=81f5cd36aad842b2074f4d4d7ac2d0ae0c993b9c>
- [94] Yue, L., Junling, B. ve Yilin, G., (2010). The relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, (24):1855-1860.
- [95] Zhang, M.H., Tam, C. ve Leow, M., (2003). Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, (33):1687-1694.
- [96] Zhang, M.H., Tam, C.T., and Leow, M.P., (2003). Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Composites*, (33):1687-1693.